

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

El mètode dels elements finits en la docència: estat de la qüestió i revisió pedagògica

MEMÒRIA

Autor: Pol Martí de la Encarnación
Director: Miquel Ferrer Ballester
Codirector: Jordi Bonada Bo
Convocatòria: Gener 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En aquest projecte es valora una possible actualització a l'ANSYS Workbench d'aquelles assignatures impartides a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona on s'utilitza el mètode dels elements finits i l'ANSYS APDL i se'n facilita la transició mitjançant l'elaboració d'un manual, adaptació de guions procedimentals i estructuració d'un curs d'introducció al programa.

D'una banda, un estudi previ mitjançant una enquesta a estudiants de grau i màster de l'Escola mostra un cert descontentament sobre la situació actual de les pràctiques i l'ús de l'ANSYS APDL i, alhora, indica que els estudiants valorarien positivament un possible canvi a la versió renovada del programari que alguns ja coneixen. Segons ells, sembla que el Workbench millora en intuïtivitat i en certes funcionalitats com l'acoblament de diferents sistemes d'anàlisi (estructurals, tèrmics, etc.) o la interacció amb la geometria, fet que en facilita l'aprenentatge.

D'altra banda, s'analitza el mercat de programari disponible de simulació numèrica aplicada a la mecànica estructural i se'n seleccionen dos alternatives: el Salome-Meca i l'ANSYS, una de programari lliure i una versió educativa de programari comercial. Tot i considerar que actualment és més interessant l'ANSYS, de cara al futur es proposa valorar l'opció de programari lliure Salome-Meca.

Finalment, després de la realització del projecte es conclou que, en conjunt, l'ANSYS Workbench millora les prestacions que ofereix l'ANSYS APDL i, per això, es creu justificada la transició al nou programa.

Sumari

RESUM	3
SUMARI	5
1. PREFACI	7
1.1. Origen del projecte	7
1.2. Motivació	7
1.3. Requeriments previs.....	7
2. INTRODUCCIÓ	8
2.1. Objectius del projecte	8
2.2. Abast del projecte.....	8
3. ANÀLISI DE LA SITUACIÓ ACTUAL	10
4. ESTUDI DEL MERCAT DE PROGRAMARIS DE SIMULACIÓ NUMÈRICA	14
4.1. Programari lliure disponible i versions acadèmiques o educacionals de programari professional.....	14
4.1.1. Programari lliure disponible.....	14
4.1.2. Versions acadèmiques de programari professional	15
4.2. Salome-Meca	16
4.3. ANSYS Workbench	17
4.4. Simulacions amb els programaris escollits.....	18
4.4.1. Comparació de resultats i conclusions	19
5. INTRODUCCIÓ A L'ANSYS WORKBENCH	21
5.1. Pantalla principal	21
5.2. Definició de les propietats dels materials	23
5.3. Definició de la geometria	24
5.3.1. Modelatge CAD amb ANSYS Discovery SpaceClaim.....	24
5.3.2. Importació de la geometria d'altres programaris de CAD	27
5.4. Definició del model	27
5.4.1. Introducció a l'ANSYS Mechanical.....	27
5.4.2. Definició del comportament de la peça	28
5.4.3. Definició de connexions	29
5.4.4. Definició del mallat	30
5.5. Aplicació de les condicions de contorn.....	32
5.6. Solucionador.....	33

5.7. Anàlisi de resultats	34
6. ANÀLISI ESTÀTICA	35
6.1. Anàlisi estàtica lineal	35
6.2. Anàlisi estàtica no lineal	36
6.2.1. No linealitats geomètriques	36
6.2.2. No linealitats materials	36
6.2.3. Contactes	38
6.2.4. Opcions de càlcul no lineals	38
7. ANÀLISI DINÀMICA	40
7.1. Anàlisi modal	40
7.2. Anàlisi de resposta harmònica	42
7.3. Anàlisi transitòria	44
7.4. Anàlisi espectral	45
CONCLUSIONS	47
BIBLIOGRAFIA	49
Referències bibliogràfiques	49
Bibliografia complementària	50

1. Prefaci

1.1. Origen del projecte

Són diverses les assignatures del Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials en les quals és present el mètode dels elements finits. En concret, entre el segon i el quart curs, hi ha quatre assignatures obligatòries on s'utilitza el mètode. El programari de simulació numèrica que s'ha utilitzat tradicionalment a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (en endavant, ETSEIB) és l'ANSYS Mechanical APDL, basat en el llenguatge APDL (abreviació d'*ANSYS Parametric Design Language*).

Per altra banda, la companyia propietària del programari, Ansys Inc., en els últims anys ha centrat els seus esforços en un producte més recent, l'ANSYS Workbench, en què, des que el 2009 es va publicar la primera versió, cada vegada hi afegixen més funcionalitats.[6] El Workbench, doncs, és una plataforma que incorpora múltiples tipus de simulacions amb una interfície gràfica visual pensada per a facilitar les tasques a l'usuari.

Aquest projecte, trobat a la borsa de Treballs de Fi d'Estudis de l'ETSEIB, neix de la necessitat d'actualitzar les assignatures en les quals s'utilitza el mètode dels elements finits i l'ANSYS APDL a la nova versió d'ANSYS Workbench, en vista de la tendència de l'empresa Ansys Inc. a potenciar el seu producte principal i la preferència per part dels estudiants per un programari més renovat com és l'ANSYS Workbench.

1.2. Motivació

L'interès personal pel mètode elements finits i els programaris de simulació numèrica han motivat l'elecció d'aquest projecte, així com també l'oportunitat de desenvolupar nous coneixements d'ANSYS i, en concret, d'ANSYS Workbench, ja que fins aleshores no havia tingut l'ocasió de tractar-lo en profunditat. A més a més, amb la realització d'aquest projecte es pretén contribuir a la millora del material docent de l'ETSEIB i l'experiència dels estudiants en les pràctiques amb ANSYS.

1.3. Requeriments previs

Per a realitzar aquest projecte han estat necessaris coneixements de mecànica estructural i del mètode dels elements finits adquirits al llarg del Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials, com també l'ús del programari ANSYS (tant en APDL com Workbench).

2. Introducció

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest projecte és valorar la possible actualització de l'ANSYS APDL a l'ANSYS Workbench en aquelles assignatures on es realitzin problemes de mecànica estructural mitjançant la simulació numèrica i el mètode dels elements finits, així com facilitar el trànsit a la versió nova en el cas que el canvi sigui justificat.

Per aconseguir-ho, hi ha altres objectius secundaris associats a l'objectiu principal com són:

- Recerca prèvia d'alternatives a l'ANSYS APDL.
- Investigació en profunditat de les característiques i funcionalitats de l'ANSYS Workbench relatives a problemes de mecànica estructural.
- Identificació de punts comuns amb l'ANSYS APDL.
- Elaboració d'un manual per facilitar el trànsit a l'ANSYS Workbench.
- Definició de guions procedimentals per a la realització d'exercicis.
- Estructuració d'un curs d'introducció a l'ANSYS Workbench.

2.2. Abast del projecte

Tot i que l'objectiu principal passa per l'actualització a l'ANSYS Workbench, en aquest projecte inicialment es presenten possibles alternatives tant de programari lliure com de versions educacionals de programari comercial a l'ANSYS APDL que s'utilitza actualment, i també una comparativa entre les opcions que es considerin més interessants de cara a valorar-ne la seva utilització.

A partir d'aquí, el projecte es basa en descriure detalladament en forma de manual els conceptes tant generals com específics sobre la utilització de l'ANSYS Workbench per a facilitar-ne l'aprenentatge. Aquest manual constitueix el contingut del curs d'introducció al programa. Primerament, s'introdueixen de forma general les interfícies i funcionament de les diferents aplicacions del programa. A continuació, es detallen més específicament les qüestions a tenir en compte a l'hora de realitzar anàlisis estàtiques i dinàmiques.

En els annexos A i B del projecte s'inclouen els guions de dues pràctiques de les assignatures de Mecànica dels Medis Continus i Resistència de Materials relacionades amb el mètode dels elements finits adaptats a l'ANSYS Workbench. Per altra banda, l'annex C presenta de manera resumida en forma de guia els procediments a seguir amb el programa per a la

realització d'exercicis.

Finalment, l'annex D planteja l'estructuració del curs d'introducció a l'ANSYS Workbench mitjançant el llistat de continguts, la seva planificació i una llista d'exercicis proposats amb la intenció de posar en pràctica les explicacions que es consideren més rellevants del manual.

3. Anàlisi de la situació actual

Per tal d'avaluar les metodologies que es duen a terme actualment en les pràctiques de les assignatures on es fa ús del mètode dels elements finits, es realitza una enquesta a diversos estudiants amb l'objectiu d'estimar la percepció que tenen sobre la situació actual de les pràctiques, de l'ANSYS APDL i un possible canvi a l'ANSYS Workbench.

L'enquesta ha estat contestada per 31 estudiants que es troben entre el tercer curs del Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials i el primer curs del Màster en Enginyeria Industrial, de manera que totes les persones enquestades han utilitzat almenys algun cop l'ANSYS APDL i algunes també l'ANSYS Workbench. Els resultats extrets de l'enquesta es comenten a continuació.

En la primera pregunta es demanava fer una valoració general sobre la utilització de l'ANSYS APDL, i els resultats mostrats en la Figura 3.1 mostren que la mitjana d'aquesta és més positiva que negativa (concretament un 3,5 sobre 5), tot i que clarament sembla que els estudiants no acaben d'estar satisfets amb l'ús del programari actual. Aquesta valoració negativa també podria estar relacionada amb un desinterès per l'aprenentatge d'eines de simulació numèrica, tot i que pels resultats de les següents preguntes no sembla que aquest sigui el cas.

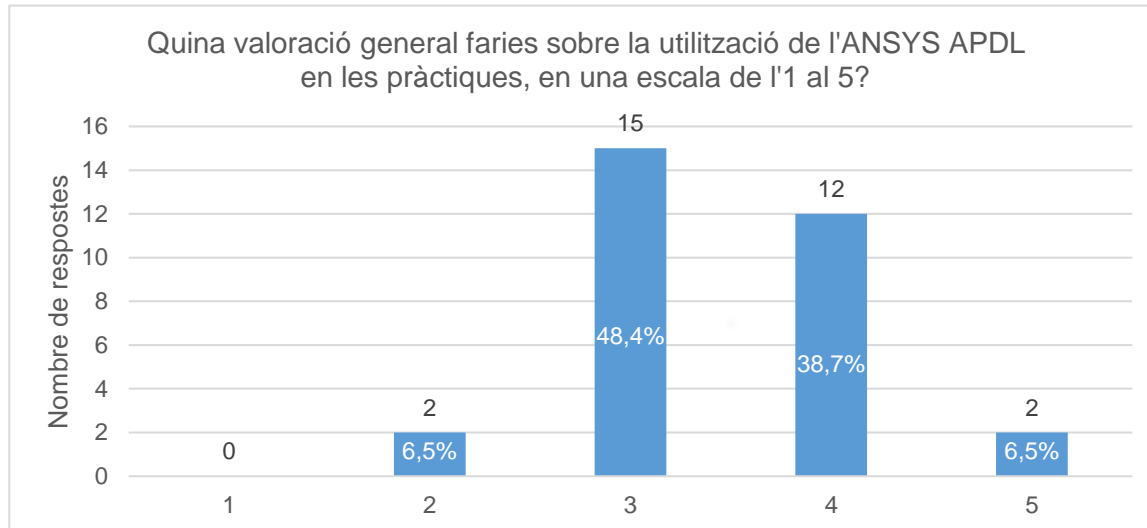


Figura 3.1. Resultats de la pregunta 1 de l'enquesta.

De fet, tot i existir un cert descontentament pel que fa a l'ús de l'ANSYS APDL, dels resultats de la segona pregunta mostrats en la Figura 3.2 se'n pot extreure que els estudiants valoren positivament (amb un 4,2 sobre 5 de mitjana) la utilitat de l'ANSYS a l'hora de resoldre simulacions de problemes estructurals, fet que corroboraria el raonament anterior.

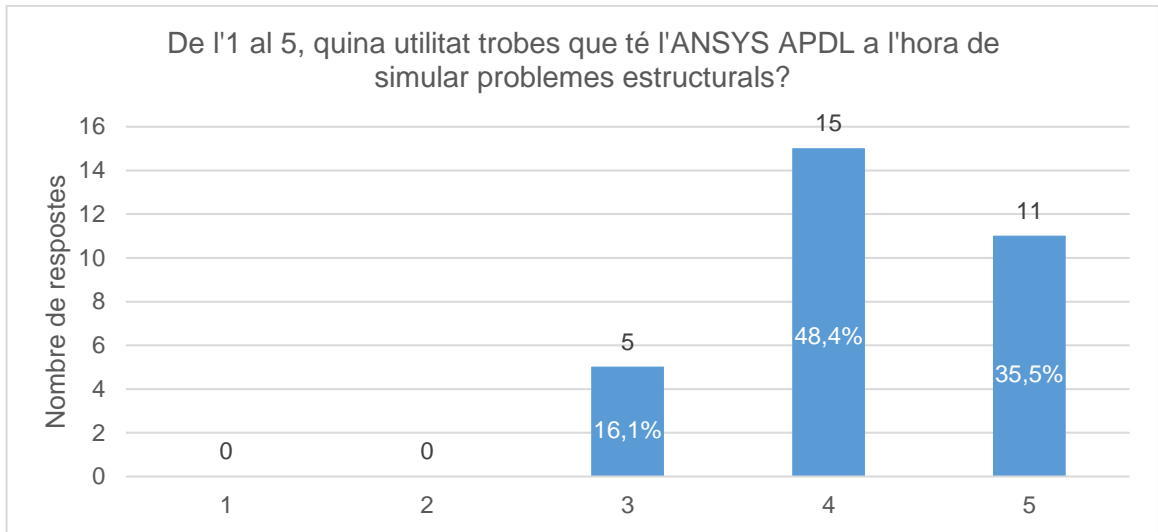


Figura 3.2. Resultats de la pregunta 2 de l'enquesta.

Per tal de detectar quins són els aspectes de l'ANSYS APDL que resulten més difícils de definir als estudiants, en la tercera pregunta se n'enumeraven alguns de forma general i dels quals, segons la Figura 3.3, en va resultar més votat la definició del mallat, seguit de la creació de la geometria, l'aplicació de les condicions de contorn i la definició del tipus d'element. Per altra banda, la definició de les propietats dels materials, el tipus d'anàlisi i l'anàlisi de resultats no semblen apartats en els quals els estudiants tinguin gaires dificultats.

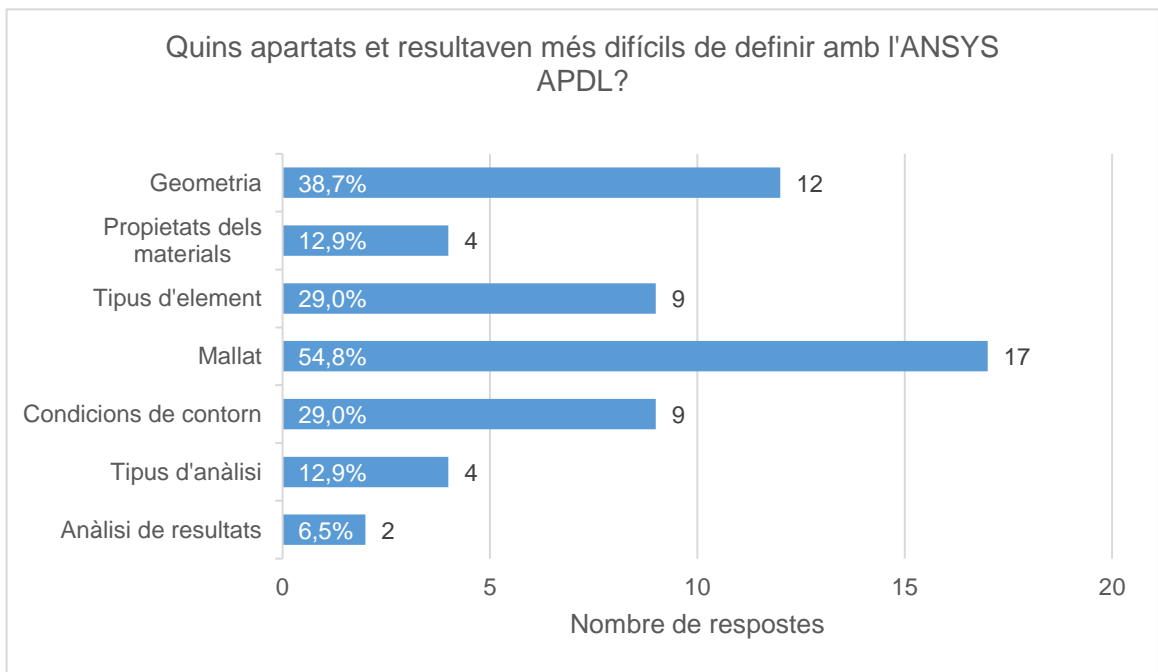


Figura 3.3. Resultats de la pregunta 3 de l'enquesta.

En la quarta pregunta es demanava que s'enumeressin més específicament algunes de les dificultats en què es troben els estudiants a l'hora de realitzar les simulacions amb l'ANSYS APDL. Les respostes més repetides estaven relacionades amb la interfície gràfica, la intuïtivitat i la dificultat per corregir errors. Una de les opinions més generalitzades respecte a l'ANSYS APDL és que es tracta d'un programari visualment no gaire atractiu, poc dinàmic i poc intuïtiu. A causa d'això, se'n deriven problemes a l'hora de generar el mallat o definir correctament les condicions de contorn. Una funcionalitat que alguns estudiants han trobat a faltar és la de poder revertir o modificar algunes accions quan aquestes s'han fet per equivocació o es voldrien canviar. Finalment, s'han detectat altres dificultats possiblement causades pel poc coneixement del programa.

A fi de valorar una possible transició de l'ANSYS APDL a l'ANSYS Workbench, a continuació es van fer una sèrie de preguntes per comparar les experiències que els estudiants han tingut amb la utilització dels dos programes. Primerament, en la cinquena pregunta, es volia saber quin percentatge dels estudiants enquestats coneixien l'ANSYS Workbench. Com es mostra en la Figura 3.4, resulta que 21 dels 31 (un 67,7%) l'han utilitzat almenys una vegada, és a dir que es compta amb un nombre important d'usuaris dels dos programaris.

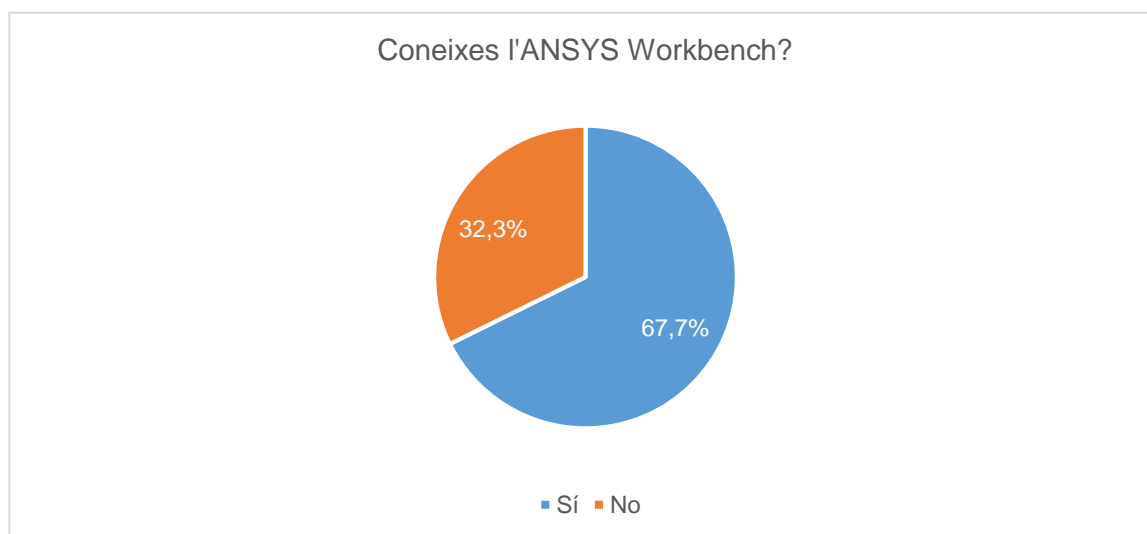


Figura 3.4. Resultats de la pregunta 5 de l'enquesta.

A continuació, en el cas que l'enquestat tingués experiència en els dos programes, es preguntava quin preferia. En la Figura 3.5 s'hi reflecteixen els resultats obtinguts i se'n desprèn que la gran majoria es decanten per l'ANSYS Workbench per sobre de l'APDL. Concretament, dels 21 estudiants amb experiència amb el Workbench, 17 (81,0%) prefereixen el primer i quatre (19,0%) escollirien el segon.

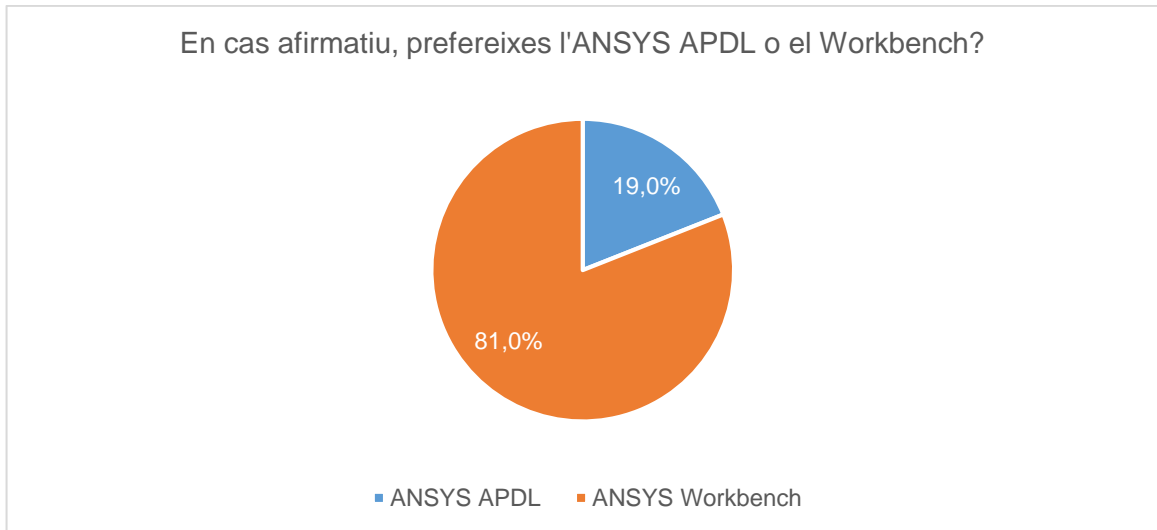


Figura 3.5. Resultats de la pregunta 6 de l'enquesta.

Finalment, en la setena pregunta, es demanava en quins aspectes creuen que l'ANSYS Workbench millora respecte a l'APDL segons la seva experiència. Les respostes, lògicament, anaven molt lligades amb les dificultats amb què es troben a l'utilitzar l'APDL de les preguntes tres i quatre. Per exemple, una gran quantitat dels enquestats destacava que el Workbench els és més fàcil d'utilitzar i d'aprendre a causa de la seva intuïtivitat i millor aspecte visual. Una de les funcionalitats del Workbench que no té l'APDL i que s'ha valorat entre els enquestats és la possibilitat de guardar projectes amb diverses anàlisis diferents (estructurals, tèrmiques, etc.). Finalment, algun estudiant també s'ha trobat amb algunes empreses del món laboral que utilitzen més l'ANSYS Workbench i no l'APDL.

En vista dels resultats de l'enquesta, es considera interessant estudiar si es justifica una possible actualització de l'ANSYS APDL a l'ANSYS Workbench, i si aquest últim millora el funcionament de les pràctiques de simulació numèrica tenint en compte la situació actual i les dificultats amb què es troben els estudiants a l'hora d'utilitzar l'ANSYS APDL.

4. Estudi del mercat de programaris de simulació numèrica

4.1. Programari lliure disponible i versions acadèmiques o educacionals de programari professional

Abans d'endinsar-se en un programari en concret, es creu oportú fer una revisió de les diferents opcions disponibles en el mercat tant de programari lliure com de professional per a la simulació numèrica de problemes de mecànica estructural mitjançant el mètode d'elements finits.

4.1.1. Programari lliure disponible

A continuació s'exposa el programari lliure que s'ha considerat més rellevant pel que fa al nombre d'usuaris i prestacions que ofereixen.

- **CalculiX** és un programari lliure d'anàlisi d'elements finits desenvolupat per Guido Dhondt i Klaus Wittig. Es divideix en dos programes principals, CalculiX GraphiX (cgx) i CalculiX CrunchiX (ccx). El primer s'utilitza per al pre i post-processament mentre que el segon resol el problema mitjançant el mètode d'elements finits. El seu solucionador és capaç de llegir dades provinents d'altres pre-processadors. Alhora, el seu pre-processador també pot generar dades d'entrada per a programaris comercials com Nastran, Ansys o Abaqus.[7]
- **Salome-Meca** és una plataforma de programari lliure dissenyada per a l'anàlisi estructural i multifísica que inclou Code_Aster com a solucionador i Salome per al pre i post-processament. El Code_Aster va ser desenvolupat per l'empresa elèctrica francesa Électricité de France (EDF). Tot i que la plataforma proporciona un entorn de simulació complet, també és possible utilitzar el Code_Aster com a solucionador independent.[8]
- **Z88Aurora** és la interfície d'usuari del programa d'anàlisi d'elements finits Z88, originalment desenvolupat pel professor Frank Rieg de la Universitat de Bayreuth alemanya. És un projecte de *freeware* (programari gratuït). La seva interfície gràfica d'usuari inclou les tres parts bàsiques: pre-processador, solucionador i post-processador.[11]

Programari	Modelatge en CAD	Importació de CAD	Interfície gràfica d'usuari (GUI)	Anàlisi				Sistemes operatius
				Estàtic		Dinàmic		
				Lineal	No lineal	Lineal	No lineal	
CalculiX	No	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Linux, Windows
Salome-Meca	Sí	BREP, STEP, IGES, STL	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Linux, Windows
Z88Aurora	No	STEP, IGES, STL, DXF	Sí	Sí	Sí	No	No	Linux, Windows, Mac OS

Taula 4.1. Comparació del programari lliure disponible.

En vista de la Taula 4.1, es considera que la opció més interessant de cara a valorar-ne la utilització és el Salome-Meca, donat que permet tant el modelatge en CAD (abreviació de *Computer-aided design*, Disseny assistit per ordinador) com la importació de models en altres formats. A més, és el programari que compta amb unes opcions d'anàlisi més àmplies en comparació amb la resta.

4.1.2. Versions acadèmiques de programari professional

A continuació s'exposen les versions acadèmiques de programari professional que s'han considerat més rellevants pel que fa al nombre d'usuaris i prestacions que ofereixen.

- **Abaqus** és un programari d'anàlisi d'elements finits desenvolupat als Estats Units, actualment propietat de l'empresa francesa Dassault Systèmes. Compta amb una versió gratuïta per a estudiants limitada fins a 1.000 nodes.[5]
- **Ansys** és un paquet de programari d'anàlisi d'elements finits desenvolupat als Estats Units que permet realitzar anàlisis estructurals, tèrmiques i electromagnètiques. Compta amb una versió gratuïta per a estudiants limitada fins a 32.000 nodes.[2] Actualment el seu producte principal és l'ANSYS Workbench, tot i que anteriorment ho era l'ANSYS APDL.
- **Nastran** és un programa d'anàlisi d'elements finits que es va desenvolupar originalment per a la NASA, tot i que actualment és especialment usat en la indústria de l'automòbil. Utilitza el Patran pel pre i post-processament. Compta amb una versió gratuïta per a estudiants limitada fins a 5.000 nodes.[10]

Programari	Modelatge en CAD	Importació de CAD	Interfície gràfica d'usuari (GUI)	Anàlisi				Sistemes operatius
				Estàtic		Dinàmic		
				Lineal	No lineal	Lineal	No lineal	
Abaqus	Sí	IGES, STEP, ...	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Linux, Windows
Ansys	Sí	IGES, STEP	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Linux, Windows
Nastran	Sí	IGES, STEP, STL, ...	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Linux, Windows, Mac OS

Taula 4.2. Comparació de les versions acadèmiques de programari professional.

Encara que les dades de la Taula 4.2 indiquen que les tres opcions són molt semblants, es considera que l'opció més adequada és l'ANSYS. Tot i tractar-se d'un programari comercial, la seva versió gratuïta per a estudiants és la que està limitada a un nombre de nodes més elevat. A més, l'ANSYS compta amb un ús extens en la indústria d'aquest àmbit i s'utilitza a l'ETSEIB des de fa temps.

4.2. Salome-Meca

La plataforma és capaç de resoldre diferents tipus d'anàlisis (estructurals estàtiques i dinàmiques, tèrmiques, termo-hidro-mecàniques, vibracions, etc.), incloent no linealitats geomètriques i materials. Els quatre mòduls bàsics que inclou la plataforma són:

- **Geometry:** el mòdul de creació de la geometria en CAD és prou extens i a més permet la importació de models CAD externs en els formats més comuns.
- **Mesh:** aquest mòdul permet la generació del mallat d'elements d'ordre lineal o quadràtic de forma triangular, quadrilateral, tetraedral o hexaedral.
- **AsterStudy:** aquest mòdul adapta el solucionador Code_Aster en una interfície gràfica d'usuari des d'on es configuren les dades de l'estudi.
- **ParaViS:** mòdul des del qual es visualitzen gràficament els resultats de la simulació.

La interfície d'usuari del Salome-Meca és intuïtiva i fàcil d'utilitzar. Tot i requerir una mínima formació per la seva utilització, els passos a seguir estan ordenats i ben estructurats. Tot i així, el major inconvenient del programa és que molts dels noms de les opcions de la interfície del mòdul AsterStudy són en francès o bé en alguna nomenclatura no gaire intel·ligible. A causa d'això, el post-procés acaba sent complicat, ja que els noms dels resultats poden ser difícils d'entendre.

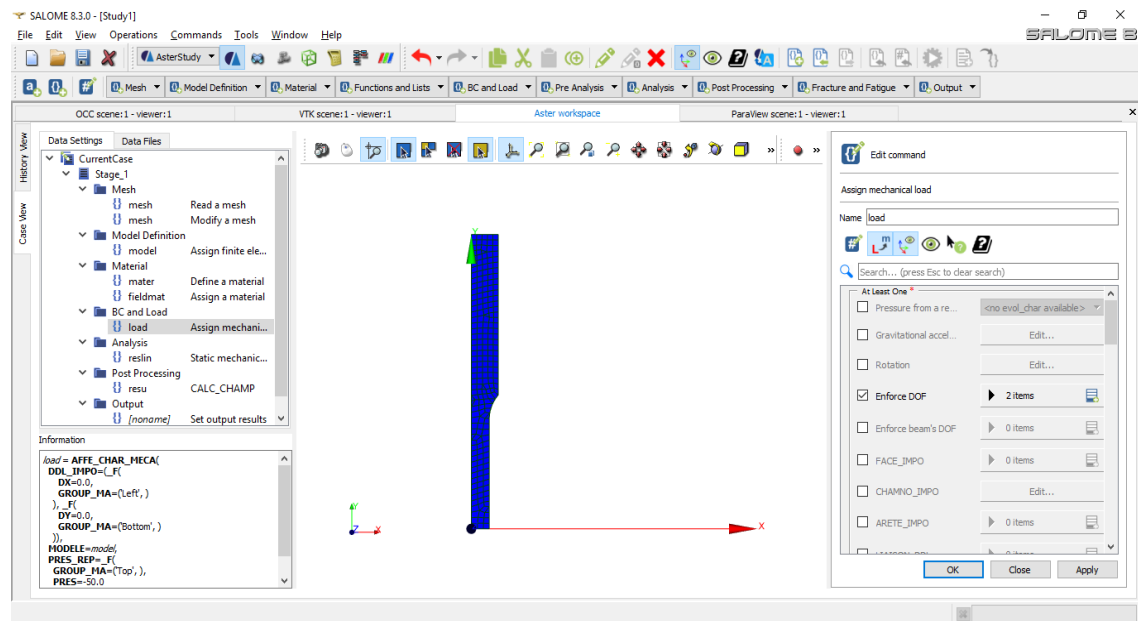


Figura 4.1. Interfície gràfica d'usuari del mòdul AsterStudy del Salome-Meca.

4.3. ANSYS Workbench

L'ANSYS Workbench té una interfície gràfica d'usuari intuïtiva i l'usuari pot anar seguint el procediment de la simulació sense gaires coneixements previs del programa. Tot i així, un dels majors inconvenients a l'hora d'entendre el funcionament del programa és la separació d'alguns apartats en aplicacions diferents, cosa que d'entrada pot resultar confusa. Si bé l'aplicació central és el Workbench, la creació de la geometria i la definició del model (mallat, condicions de contorn) juntament amb el post-procés es realitzen en aplicacions separades: ANSYS SpaceClaim (o ANSYS DesignModeler) i ANSYS Mechanical, respectivament.

Una de les principals diferències és la quantitat de paràmetres ja incorporats. Per exemple, molts dels materials més utilitzats ja estan definits amb les seves propietats i només cal seleccionar-los. Un altre exemple és que en funció del tipus d'anàlisi i geometria el Workbench selecciona automàticament el tipus d'element més adequat (sòlid 2D, sòlid 3D, barra, etc.). En relació a la creació de la geometria el Workbench incorpora dos programaris diferents prou avançats que permeten crear geometries complexes. Una altra funcionalitat a destacar és

l'acoblament de diferents anàlisis que permet compartir els resultats entre elles.

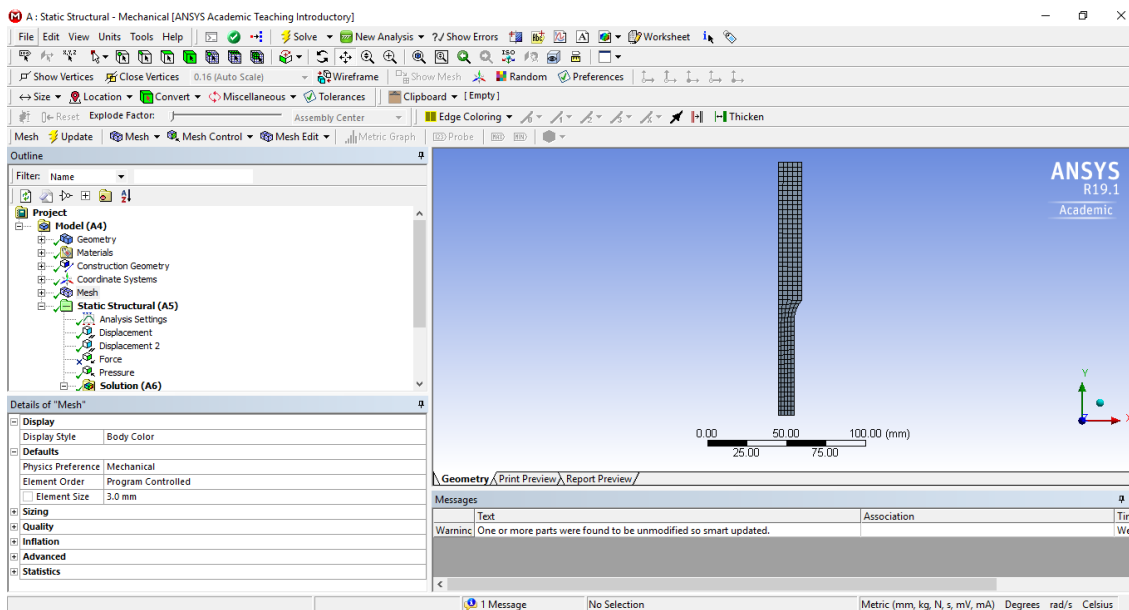


Figura 4.2. Interfície gràfica d'usuari de l'ANSYS Mechanical.

4.4. Simulacions amb els programaris escollits

Per tal de tenir més informació sobre les dues opcions escollides de programari de simulació numèrica es realitza una simulació d'un problema extret de la Pràctica 3 de l'assignatura Mecànica dels Medis Continus amb tots dos programaris.

Es tracta d'estudiar una proveta d'acer de 2 mm de gruix sotmesa a un esforç de tracció pura amb una força vertical de 1500 N. En relació al mallat dels elements el problema requeria la utilització d'elements sòlids 2D de segon ordre, una mida d'element de 3 mm i la consideració del cas de tensió plana.

A fi de millorar el model per elements finits, es realitza la simulació substituint la força vertical per una pressió uniforme de 50 MPa en la línia superior (la secció a la part del cap de la proveta és de 30 mm²), eliminant així la singularitat numèrica causada per la força puntual.

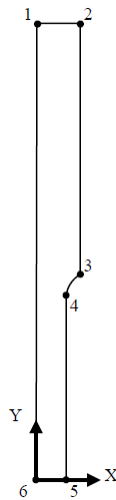


Figura 4.3. Geometria del problema [4]

4.4.1. Comparació de resultats i conclusions

En primer lloc es calculen amb els dos programes els desplaçaments verticals i a continuació les tensions verticals (σ_y). Com es pot comprovar en la Figura 4.4 i la Figura 4.5 els resultats són molt similars, ja que la distribució és pràcticament idèntica, així com també els valors màxims i mínims i el lloc on es produeixen. Per tant, es pot afirmar que els dos compleixen amb la seva funció.

Tot i així, es creu que la presentació dels resultats és més clara en el cas de l'ANSYS Workbench, ja que també facilita informació sobre el tipus d'anàlisi realitzada i les unitats del resultat, entre altres. A més, com s'ha comentat anteriorment, la nomenclatura dels resultats obtinguts amb el Salome-Meca no és trivial, fet que dificulta la comprensió a primera vista del resultat que s'està visualitzant.

Un aspecte a favor del Salome-Meca, però, és que es tracta d'un programari lliure. Es considera important fomentar la utilització de programari lliure dins l'àmbit educatiu i també professional. D'altra banda, existeix una comunitat professional anomenada *Code_Aster Professional Network*, formada per organitzacions usuàries de les plataformes Code_Aster i Salome-Meca provinents tant del món acadèmic com industrial, amb l'objectiu de compartir experiències i resoldre problemes, fet que demostra el potencial del programa. És per això, que pot ser interessant valorar la utilització de la plataforma de cara al futur.

No obstant això, com ja s'ha mencionat, actualment l'ús de l'ANSYS en la indústria de la mecànica estructural és més extens i es disposa d'una quantitat de documentació associada superior que en el cas del Salome-Meca. A més, l'ANSYS és el que s'ha utilitzat tradicionalment a l'ETSEIB i actualment no es contempla un canvi.

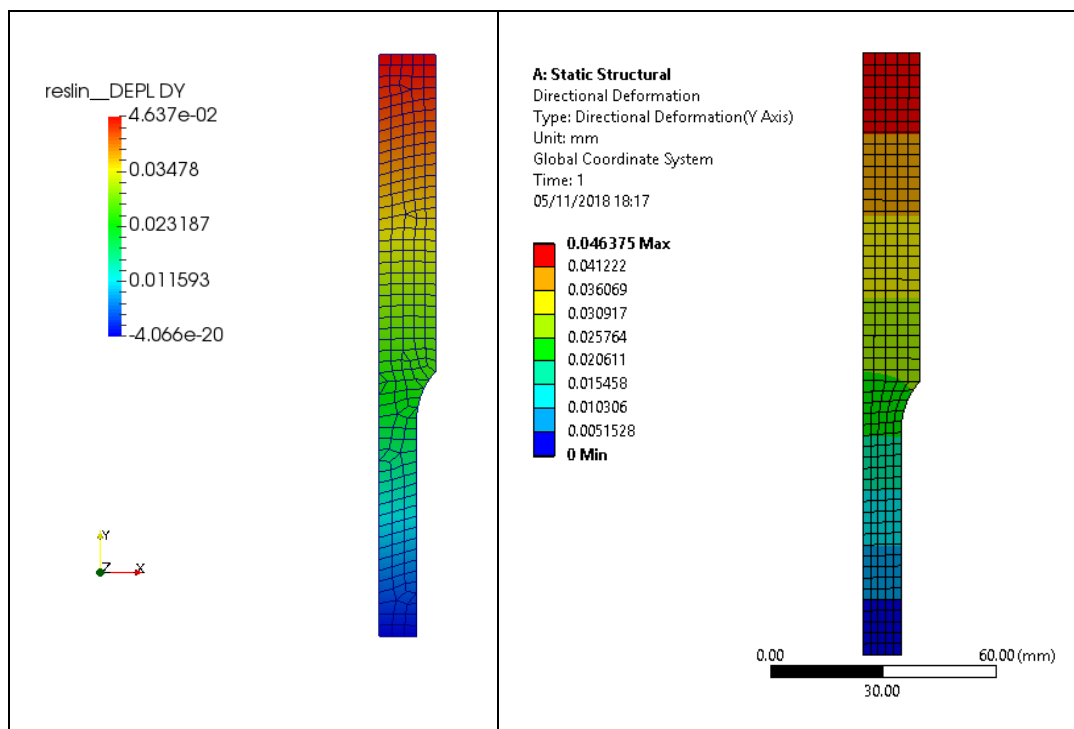


Figura 4.4. Desplaçaments verticals en Salome-Meca (esquerra) i ANSYS (dreta).

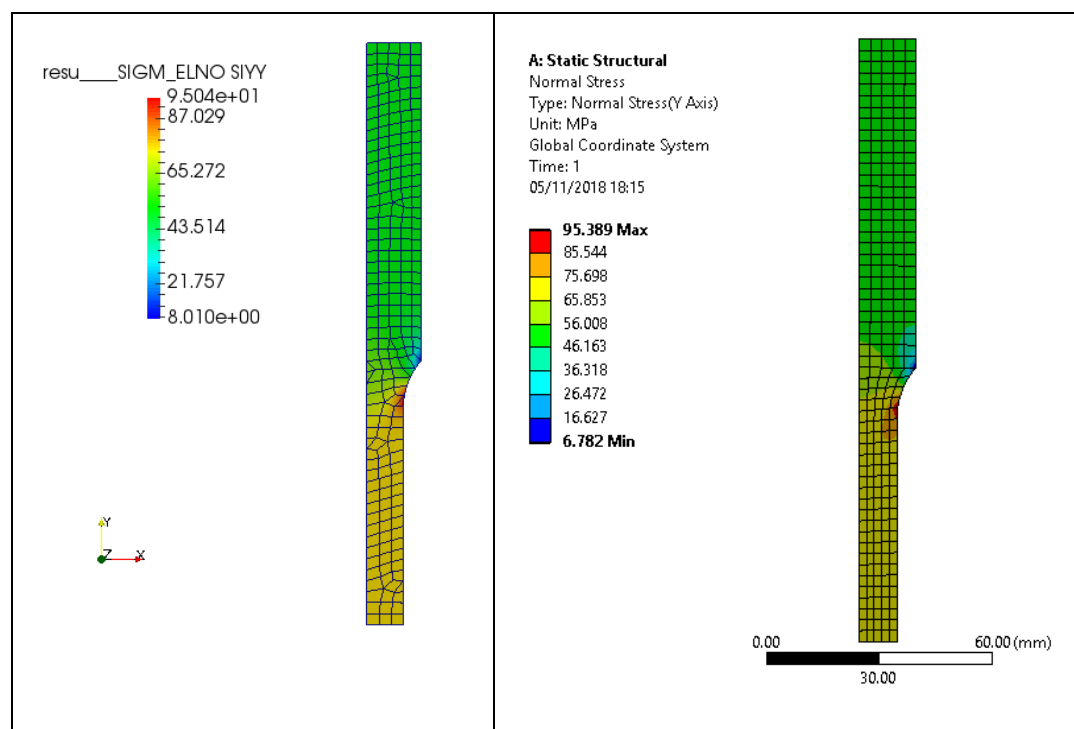


Figura 4.5. Tensions verticals (σ_y) en Salome-Meca (esquerra) i ANSYS (dreta).

5. Introducció a l'ANSYS Workbench

A continuació, en els apartats 5, 6 i 7, es detallen els procediments i menús més utilitzats en forma de manual per facilitar l'aprenentatge de l'ANSYS Workbench tant per usuaris de la versió ANSYS APDL com per usuaris nous. A més a més, també es fa referència a algunes de les principals diferències entre l'ANSYS Workbench i l'ANSYS APDL. La informació proporcionada és d'elaboració pròpia amb l'ajuda de la referència [1] per qüestions específiques.

5.1. Pantalla principal

Quan s'executa l'ANSYS Workbench per primera vegada apareix una finestra amb la pestanya Project oberta. Aquesta està dividida en dues parts diferenciades: a la part esquerra el Toolbox (caixa d'eines) i a la part central el Project Schematic (esquema del projecte). El Toolbox inclou diferents apartats dels quals el més rellevant és el primer, Analysis Systems, on hi ha tots els tipus d'anàlisi que el Workbench pot simular (anàlisis estructurals, tèrmiques, de dinàmica de fluids, etc). Per altra banda, en el Project Schematic s'afegeixen mitjançant doble clic o bé arrossegant sistemes d'anàlisi del Toolbox i després interaccionant amb aquests sistemes.

A diferència de l'ANSYS APDL, en el qual només es disposa d'una única finestra des de la qual es realitza tota l'anàlisi, la pantalla principal del Workbench serveix per gestionar els diferents sistemes d'anàlisi que formen el projecte i executar les diferents aplicacions d'ANSYS associades a cada component del sistema.

Cada sistema situat en el Project Schematic pot compondre's de més d'un component d'anàlisi ubicats en diferents cel·les. A més, els projectes poden variar de complexitat, des d'un únic sistema d'anàlisi que representi tots els passos necessaris per a l'anàlisi desitjada, a un conjunt de sistemes amb components o cel·les compartides, per exemple la geometria o les dades de les propietats dels materials (com el de la Figura 5.1). Aquesta característica de l'ANSYS Workbench el diferencia respecte a l'APDL, en el qual només es permet realitzar una única anàlisi simultàniament.

Generalment es treballa amb cada cel·la del sistema de dalt a baix, ja que les dades flueixen a través del sistema en el sentit anomenat *downstream* (de dalt a baix). Així, per exemple, la geometria s'ha de crear abans de definir el model, ja que la cel·la Model utilitza la geometria definida a la cel·la Geometry com a entrada.

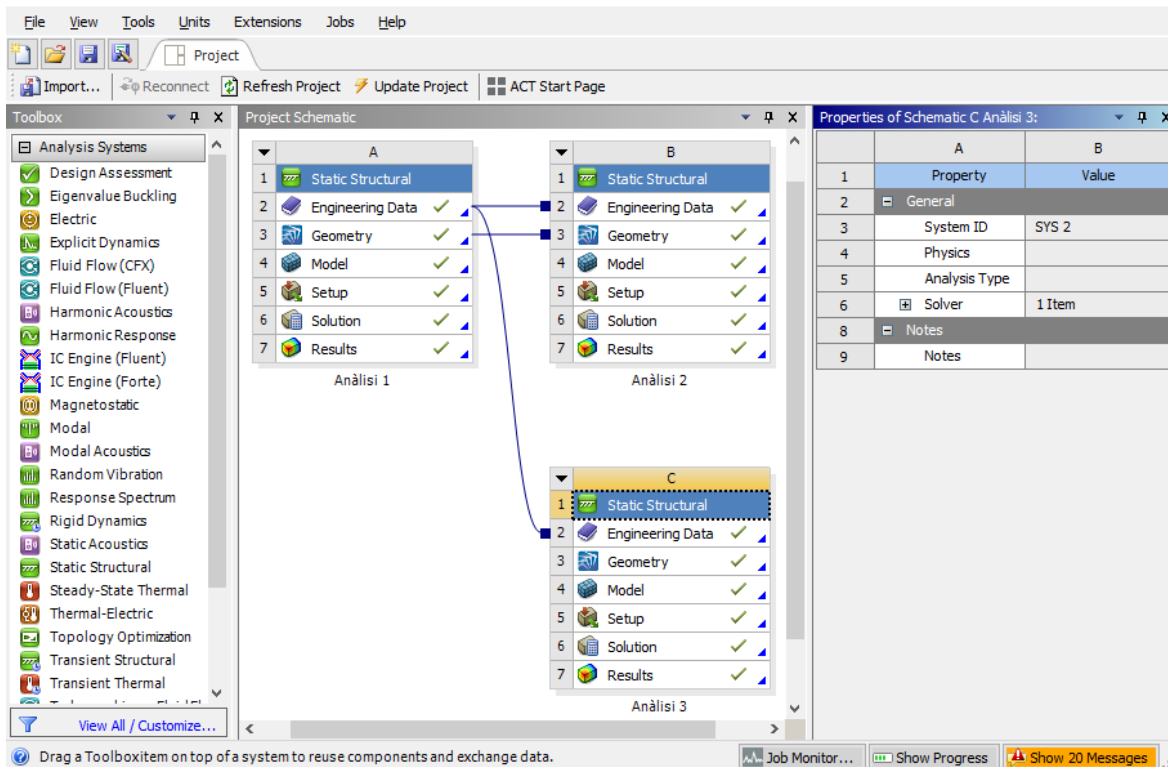


Figura 5.1. Interfície gràfica d'usuari de l'ANSYS Workbench.

Les icones de cada cel·la indiquen el seu estat en particular. Per exemple, si el component està correctament definit s'indica amb una icona d'un tic verd, si necessita actualitzar-se es fa amb un raig groc, si encara no s'ha definit es fa amb un interrogant blau, etc. Principalment, hi ha tres maneres d'interaccionar amb les cel·les component: executant una aplicació independent del Workbench, obrint una pestanya dins del Workbench o assignant propietats als components de l'anàlisi. La majoria dels sistemes d'anàlisi tenen els mateixos components:

- La cel·la Engineering Data s'utilitza per definir les propietats del material i obre una nova pestanya dins del Workbench.
- La cel·la Geometry permet triar entre dues opcions: dissenyar la geometria des d'una de les aplicacions independents incorporades al Workbench (ANSYS Discovery SpaceClaim i ANSYS DesignModeler) o bé importar un model CAD creat amb altres programaris externs.
- Les cel·les Model, Setup, Solution i Results obren l'aplicació ANSYS Mechanical, que s'utilitza per configurar, resoldre i analitzar els resultats de la simulació.

Per tal d'assignar propietats als components de l'anàlisi cal visualitzar el menú de propietats a través del menú superior (View → Properties) que apareixerà a la part dreta de la pestanya Project. Fent clic sobre les diferents cel·les del sistema farà que les opcions del menú Properties canviïn d'acord amb el component seleccionat.

Un pas recomanable abans de començar a interaccionar amb les cel·les, però, és el de definir el sistema d'unitats amb el qual es voldrà treballar al llarg del projecte. A fi d'això, cal desplegar en el menú superior l'opció de Units i seleccionar el sistema desitjat. Si aquest no es troba dins dels sistemes proposats caldrà afegir-lo clicant a Unit Systems en el menú desplegat.

5.2. Definició de les propietats dels materials

La cel·la component Engineering Data obre una nova pestanya dins del Workbench on es defineixen les propietats dels materials. La interfície de la pestanya d'Engineering Data conté els següents elements:

- Toolbox: mostra els tipus de dades que es poden incloure a Engineering Data.
- Panell Outline: mostra els materials continguts a Engineering Data i Engineering Data Sources.
- Panell Properties: mostra les propietats del material seleccionat al panell Outline.
- Panell Table: mostra les dades de la propietat seleccionada al panell Properties en forma de taula.
- Panell Chart: mostra la propietat seleccionada al panell Properties en forma de gràfic.

Per afegir un nou material cal fer clic a l'última fila del panell Outline i introduir el nom del material. A continuació fer doble clic al tipus de dades del Toolbox que es volen afegir i introduir-les al panell Outline o al panell Properties.

A diferència de l'ANSYS APDL, el Workbench disposa d'una base de dades amb materials predefinits. Si es fa clic al botó Engineering Data Sources, es mostren les fonts de dades dels materials que s'inclouen amb l'ANSYS Workbench, ordenats en diferents llibreries (materials generals, compostos, hiperelàstics, fluids, etc.).

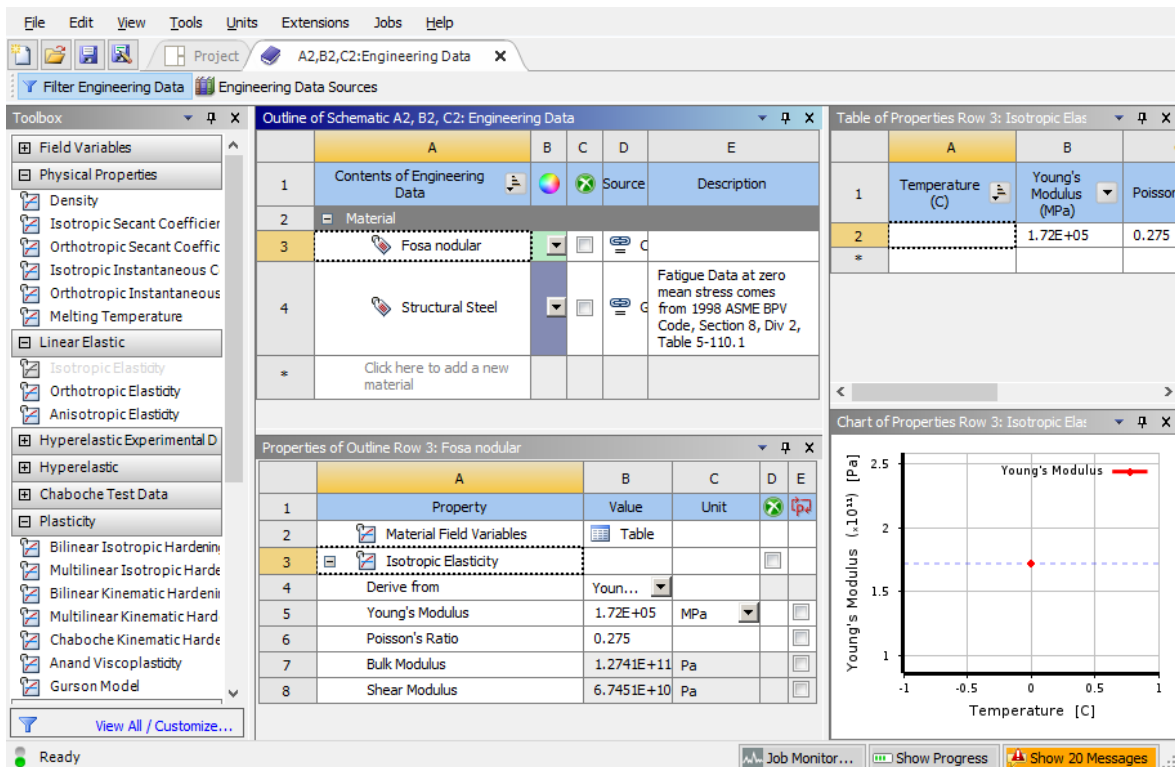


Figura 5.2. Interfície del mòdul d'Engineering Data.

5.3. Definició de la geometria

Quant a la definició de la geometria amb l'ANSYS Workbench, aquest té moltes més possibilitats que l'APDL. El Workbench incorpora dues aplicacions de CAD mitjanament avançades (ANSYS Discovery SpaceClaim i ANSYS DesignModeler) i, a més, facilita la importació de models creats mitjançant altres programaris.

A continuació es detallen els aspectes bàsics del modelatge CAD mitjançant l'ANSYS Discovery SpaceClaim (que es tracta de l'opció per defecte), així com també els procediments per importar models CAD creats amb programaris externs.

5.3.1. Modelatge CAD amb ANSYS Discovery SpaceClaim

L'ANSYS Discovery SpaceClaim és un programari de CAD capaç de crear geometries tant en 2D com en 3D. És una aplicació independent de l'ANSYS Workbench que s'executa en clicar dos cops sobre la cel·la del component Geometry de qualsevol sistema. També es pot executar mitjançant un clic amb el botó dret a Geometry i seleccionar "New SpaceClaim Geometry...".

La interfície de l'ANSYS SpaceClaim està dividida en tres parts: la caixa d'eines superior separada en diferents pestanyes; els panells Structure, Options i Properties situats a l'esquerra; i la finestra central de disseny. En la pestanya Design de la caixa d'eines s'hi troben la majoria d'eines necessàries pel disseny de la geometria, mentre que al panell lateral Structure apareixeran els diferents objectes de la geometria (superfícies, sòlids, etc.).

Per crear una geometria tant en 2D com en 3D, primer de tot és necessari seleccionar un nou pla de *sketch* (dibuix) clicant el botó Sketch Mode de l'apartat Mode de la caixa d'eines i després clicant el pla desitjat (per exemple: el pla XY, una superfície ja existent, etc.). Per orientar la vista de la finestra de disseny de manera perpendicular al pla de *sketch* es pot fer clic a l'eina Plan View de l'apartat Orient de la caixa d'eines, mentre que amb les eines Spin i Pan es pot rotar o moure la vista segons convingui, respectivament.

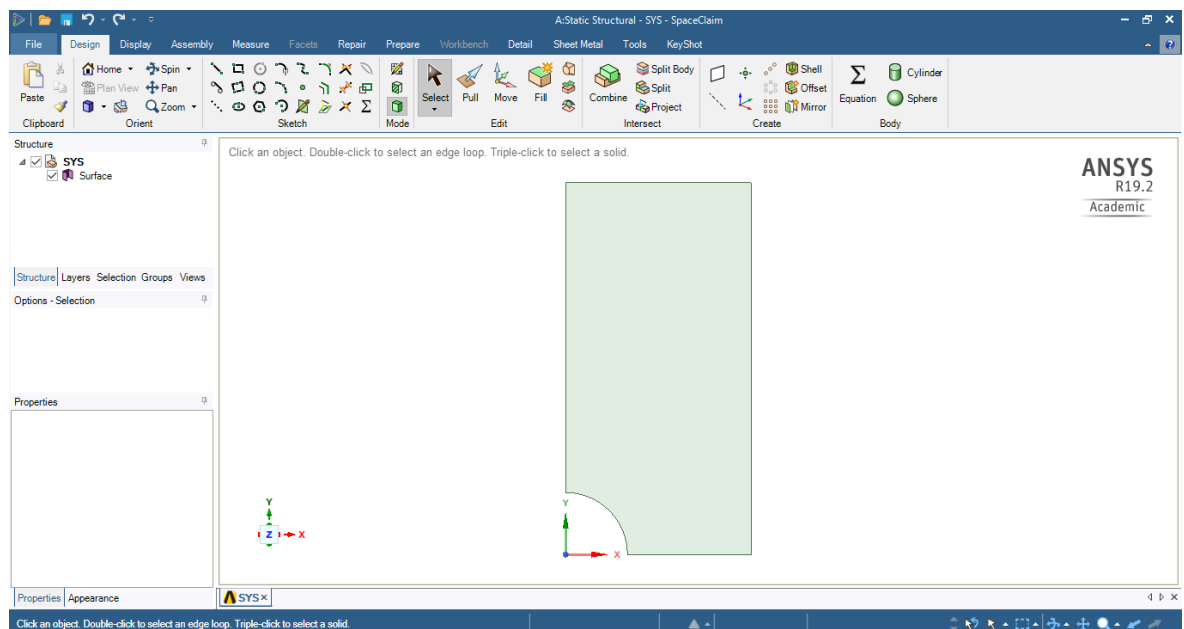


Figura 5.3. Interfície gràfica d'usuari de l'ANSYS Discovery SpaceClaim.

Creació de sòlids 2D i 3D

A l'apartat Sketch de la caixa d'eines superior es troben totes les eines de dibuix habituals (creació de punts, línies, rectangles, cercles, arcs, el·lipses, etc.). A mesura que es dibuixa la geometria, s'han d'introduir les mesures de cada part. Un cop definit un dibuix en 2D, cal passar al mode 3D per formar una superfície a partir del dibuix clicant el botó 3D Mode de l'apartat Mode de la caixa d'eines o bé prement la tecla D.

Des del mode 3D, hi ha tres eines bàsiques de modelatge: Pull, Move, Fill i Combine.

- L'eina Pull serveix per extrudir, revolucionar o arrodonir superfícies, arestes o vèrtexs.

- Amb l'eina Move es poden traslladar o rotar objectes ja dibuixats.
- L'eina Fill omple la zona seleccionada amb el material que l'envolta. Per exemple, es poden omplir buits creats per forats o eliminar l'arrodoniment d'un vèrtex.
- L'eina Combine realitza operacions booleanes entre peces, com per exemple la unió o divisió d'objectes.

Un cop creada la geometria, es pot tancar sense desar l'SpaceItem per tornar a la finestra principal del Workbench. Des de la finestra del projecte cal comprovar que a les opcions (Properties) de la cel·la del component Geometry estigui seleccionada l'opció del tipus d'anàlisi (Analysis Type) que convingui: 2D o 3D.

Creació de bigues

Per a la creació de geometries tipus biga, primer cal crear l'estructura mitjançant línies i després assignar la secció corresponent a cada tram de l'estructura. Per dibuixar l'*sketch* de les línies que formaran l'estructura s'utilitza l'eina de dibuix de línies de l'apartat Sketch. Un cop definit el dibuix cal passar al mode 3D clicant el botó 3D Mode de l'apartat Mode de la caixa d'eines o bé prement la tecla D.

Per definir la secció de la biga cal passar a la pestanya Prepare. En l'apartat Beams s'hi troben les eines necessàries per escollir el perfil. Si es desplega l'opció Profiles es mostren els tipus de perfil més comuns (circular, rectangular, tipus L, T, doble T, etc.), a més d'una llibreria de perfils estàndard de les normes AISC i Eurocode. Després de seleccionar un tipus de perfil, aquest apareixerà dins la carpeta desplegable Beam Profiles del panell lateral Structure. Si el perfil seleccionat no té unes dimensions estàndard, aquestes es poden modificar fent clic amb el botó dret sobre el perfil al panell lateral i seleccionar Edit Beam Profile. S'obrirà una altra finestra de dibuix i al panell lateral s'han d'introduir les dimensions desitjades.

Un cop definida la secció de la biga, cal assignar-la a les línies creades anteriorment amb l'eina Create de l'apartat Beams clicant a cada línia del model. Amb l'eina Orient es pot definir l'orientació i desplaçament de la secció. Finalment, si la biga està composta per més d'un tram, és necessari indicar quins punts d'unió són compartits. Per fer-ho, mitjançant l'eina Share de l'apartat Sharing de la pestanya Workbench, cal clicar tots els vèrtexs d'unió.

Per tornar a la finestra principal del Workbench, es pot tancar l'SpaceItem sense desar. En el cas de geometries tipus biga cal comprovar des de la finestra del projecte que a les opcions (Properties) de la cel·la del component Geometry hi hagi seleccionat el tipus d'anàlisi (Analysis Type) 3D.

5.3.2. Importació de la geometria d'altres programaris de CAD

Si en lloc de crear la geometria des d'una de les dues opcions de CAD que ofereix el propi ANSYS Workbench (SpaceClaim i DesignModeler) es prefereix importar un model creat amb un programari extern de CAD, s'ha de desar prèviament en format IGES o STEP. Per importar el model cal fer clic amb el botó dret sobre la cel·la del component Geometry i seleccionar Import Geometry i, a continuació, buscar-la mitjançant Browse. Un cop importada la peça, aquesta també es pot modificar internament fent doble clic sobre el component Geometry o bé fent clic amb el botó dret i seleccionar Edit Geometry.

Per poder continuar i evitar errors és important comprovar que a les opcions de Geometry s'hagi seleccionat 2D o 3D, segons convingui.

5.4. Definició del model

5.4.1. Introducció a l'ANSYS Mechanical

Després de la definició de la geometria es pot passar a la definició del model fent doble clic al component Model o bé fent clic amb el botó dret a Model i seleccionar Edit. Amb aquesta acció s'executa una aplicació independent a l'ANSYS Workbench anomenada ANSYS Mechanical, des d'on es completa la definició del model, s'apliquen les condicions de contorn, es resol i s'analitzen els resultats de la simulació.

La interfície gràfica d'usuari de l'ANSYS Mechanical està composta bàsicament per unes barres d'eines superiors, de les quals algunes són fixes i altres canvien en funció de l'objecte que es defineixi; el panell esquerre Outline, que conté una llista ordenada en forma d'arbre dels objectes inclosos al projecte i des de la qual s'escull l'objecte a definir; el panell esquerre Details, que conté detalls sobre l'objecte que s'hagi seleccionat a l'Outline; i la finestra gràfica, que mostra una representació gràfica de l'objecte seleccionat a l'Outline en forma de figura en 3D, 2D, taula, etc.

El panell Outline, situat a la part superior esquerra de la finestra, indica l'ordre lògic dels passos a seguir de la simulació. D'alguns objectes se'n desprenen altres referents a l'objecte pare. Fent clic amb el botó dret sobre un objecte s'obre un menú d'opcions relacionades amb aquest objecte. Si se selecciona un objecte de l'Outline, es mostren els atributs i els controls de l'objecte seleccionat al panell Details i la finestra central Geometry mostra el model gràficament. De manera similar a la finestra principal de l'ANSYS Workbench, al costat de cada objecte del panell Outline apareix una icona que per ajudar a distingir de manera intuïtiva el tipus d'objecte (geometria, malla, condició de contorn, resultat, etc.) i el seu estat (definit correctament, no definit, amb necessitat d'actualitzar-se, etc.).

El panell Details, situat a la part inferior esquerra de la finestra, permet definir els paràmetres l'objecte seleccionat al panell Outline. Alguns paràmetres requereixen la introducció d'un valor numèric (valors de força, pressions, etc.) i d'altres permeten seleccionar una opció d'un menú desplegable.

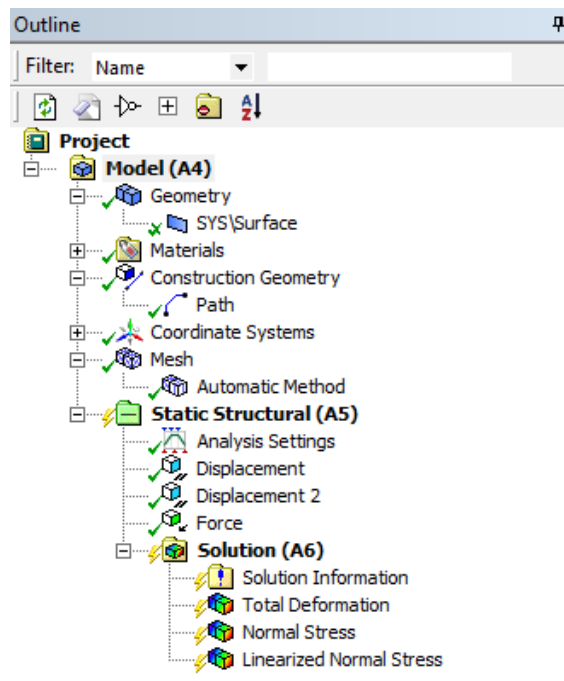


Figura 5.4. Exemple del panell lateral Outline.

5.4.2. Definició del comportament de la peça

Per geometries en 2D, si es vol definir la simplificació de tensió plana, deformació plana o model axisimètric, s'ha de seleccionar Geometry al panell Outline i en el camp 2D Behavior de l'apartat Definition del panell Details seleccionar el cas desitjat. Per introduir el gruix de la peça s'ha de seleccionar l'objecte que es desprèn de l'objecte Geometry corresponent a la superfície i introduir el seu valor en el camp Thickness de l'apartat Definition del panell Details.

Quant a l'assignació del material, si se selecciona la peça dins de Geometry en el panell Outline, el menú desplegable Assignment dins de l'apartat Material en el panell Details mostra els materials prèviament afegits al component Engineering Data del projecte.

Una altra possible característica a definir és la rigidesa de la peça. Tenint seleccionada la peça dins de Geometry en el panell Outline, es pot escollir dins del camp Stiffness Behavior si el cos és flexible o rígid. Els cossos flexibles seran mallats amb elements finits, mentre que els cossos rígids seran reduïts a un element massa situat al centre de gravetat del cos i no tindran ni tensions ni deformacions. Per defecte, l'ANSYS Workbench considera tots els cossos com a flexibles.

5.4.3. Definició de connexions

Per tal que els diferents cossos del model estiguin connectats en aplicar les càrregues cal establir les connexions necessàries entre ells. Hi ha diferents tipus de connexió: contactes, articulacions, connexions de malla, molles, connexions de bigues, etc. Totes les connexions del model s'inclouen dins de l'objecte Connections del panell Outline excepte les connexions de malla que corresponen a l'objecte Mesh.

Els objectes dels tipus de connexió de contactes i articulacions se situen en una sub-carpeta dins de l'objecte Connections anomenada Connection Group. Quan s'importa un model a l'ANSYS Mechanical, aquest detecta automàticament si dos cossos estan en contacte i genera el corresponent objecte Contact Region dins de Connection Group. En cas que l'ANSYS no detecti automàticament un contacte, aquest també es pot definir manualment fent clic amb el botó dret sobre Connections i seleccionant Insert → Connection Group. Alternativament, es pot fer clic directament sobre l'eina Connection Group de l'apartat Connections de la barra d'eines superior. A continuació, cal afegir l'objecte contacte fent clic amb el botó dret sobre Connection Group i seleccionar Insert → Manual Contact Region. Quan se selecciona un objecte Contact Region del panell Outline, s'habilita la definició d'aquell contacte en el panell Details. En l'apartat Scope cal seleccionar les dues geometries (línies, superfícies, cossos, etc.) en contacte des dels camps Contact i Target, i en l'apartat Definition escollir el tipus de contacte (unit, sense separació, sense fricció, rugós o friccional) i definir els paràmetres necessaris (coeficient de fricció, comportament, etc.)

Per detectar automàticament les superfícies de contacte en el cas de voler definir una articulació, primer cal especificar que l'objecte Connection Group es tracta d'una articulació. A fi d'això, des del panell Details havent seleccionat l'objecte Connection Group, se selecciona el tipus de connexió (Joint) en el camp Connection Type dins l'apartat Definition. A continuació, cal fer clic amb el botó dret sobre l'objecte Connection Group i seleccionar Create Automatic Connections. D'aquesta manera, es crearan tants sub-objectes de tipus Joint com parells de superfícies s'hagin detectat. Amb l'objecte Joint seleccionat al panell Outline, s'habilita la definició d'aquella articulació en el panell Details. En l'apartat Definition cal escollir el tipus d'articulació (fixa, de revolució, cilíndrica, de translació, etc.), seleccionar la geometria (línia, superfície, cos, etc.) de referència en el camp Scope de l'apartat Reference i seleccionar la geometria mòbil en el camp Scope de l'apartat Mobile.

La resta de tipus de connexions es poden definir directament fent clic amb el botó dret sobre l'objecte Connections del panell Outline i seleccionant Insert i el tipus desitjat (molla, coixinet, etc.). Amb l'objecte de connexió desitjat seleccionat al panell Outline, s'habilita la seva definició en el panell Details.

5.4.4. Definició del mallat

L'objecte corresponent al mallat del model en l'ANSYS Mechanical és l'anomenat Mesh. Si se selecciona l'objecte Mesh del panell Outline, des del panell Details es pot definir l'ordre global dels elements (lineal o quadràtic) al camp Element Order i introduir la mida global dels elements al camp Element Size.

Per definir el tipus d'elements a utilitzar en cossos superfície o sòlids, s'ha d'afegir l'objecte Method dins l'objecte Mesh. A tal fi, cal fer clic amb el botó dret sobre Mesh i seleccionar Insert → Method o bé seleccionar Mesh Control → Method a la barra d'eines superior. Un cop afegit, des del panell Details se selecciona la geometria sobre la qual es vol aplicar el mètode de mallat en el camp Geometry, s'escull el tipus d'element al camp Method i l'ordre local dels elements a Element Order (si aquest és diferent de l'ordre global escollit des de Mesh).

Per a cossos superfície, les tres opcions disponibles de tipus d'element dins de Method són:

- Quadrilateral Dominant: el mallat resultant són quadrilàters. En el camp Free Face Mesh Type es pot escollir entre Quad/Tri (per defecte, s'admeten elements quadrilàters i triangulars) i All Quad (s'intenta mallar amb només quadrilàters).
- Triangles: tots els elements del mallat són triangulars.
- MultiZone Quad/Tri: es crea una malla de quadrilàters i/o triangles, depenent del valor que s'introdueixi en el camp Free Face Mesh Type (All Tri, All Quad, Quad/Tri).

Per a cossos sòlids, les sis opcions disponibles dins del camp Method són:

- Automatic: és la opció per defecte i intentarà utilitzar el mètode Sweep si el tipus de cos ho permet.
- Tetrahedrons: es crea una malla de tetraedres.
- Hex Dominant: el mallat resultant són hexaedres.
- Sweep: intenta fer un mallat Sweep si el cos ho permet. En cas contrari, el mallat fallarà i no es podrà generar.
- MultiZone: per defecte intenta crear una malla hexaèdrica. Al camp Mapped Mesh Type es pot determinar el tipus d'elements (Hexa, Hexa/Prism, Prism).
- Cartesian: La malla consisteix principalment en elements hexaedrals, amb cares que s'alineen amb els eixos de coordenades.

Si s'insereix l'objecte Sizing fent clic amb el botó dret sobre Mesh i seleccionant Insert → Sizing o bé seleccionant Mesh Control → Sizing a la barra d'eines superior, es poden donar instruccions quant a la mida dels elements, ja sigui especificant una mida local dels elements o definint el nombre d'elements en determinades arestes o cares. Amb aquesta eina també es pot definir el nombre de divisions d'elements de tipus biga.

L'ANSYS també permet el refinat de malles compostes per només elements tetraèdrics. A tal fi, cal inserir l'objecte Refinement fent clic amb el botó dret sobre Mesh i seleccionar Insert → Refinement o bé seleccionant Mesh Control → Refinement a la barra d'eines superior. A continuació, des del panell Details, cal seleccionar l'entitat (o conjunt d'entitats) al voltant de la qual es vol fer el refinat en el camp Geometry i especificar el nivell de refinat que es vol fer en el camp Refinement.

Per generar el mallat o bé actualitzar-lo després de modificar algun paràmetre, cal prémer el botó Update de la barra d'eines superior o bé fer clic amb el botó dret sobre Mesh i seleccionar Update o Generate Mesh.

Per definir un mallat continu entre diferents cossos cal inserir l'objecte Mesh Connection. Si els cossos estan suficientment a prop aquest objecte es pot generar automàticament mitjançant l'objecte Mesh Connection Group. Per afegir-lo cal fer clic amb el botó dret sobre Mesh i seleccionar Insert → Mesh Connection Group o bé seleccionar Mesh Edit → Mesh Connection Group a la barra d'eines superior. A continuació, per detectar les connexions de malla, cal fer clic amb el botó dret sobre l'objecte Mesh Connection Group i seleccionar Detect Connections. Aquesta acció generarà el sub-objecte anomenat Mesh Connection, que defineix la connexió de malla entre els múltiples cossos. Si l'ANSYS no detecta automàticament les connexions de malla, també es pot crear manualment un objecte Mesh Connection fent clic amb el botó dret sobre qualsevol objecte de mallat i seleccionar Insert → Manual Mesh Connection. Des del panell Details cal seleccionar les dues geometries de connexió (línies, superfícies, etc.) en els camps Master Geometry i Slave Geometry de l'apartat Scope.

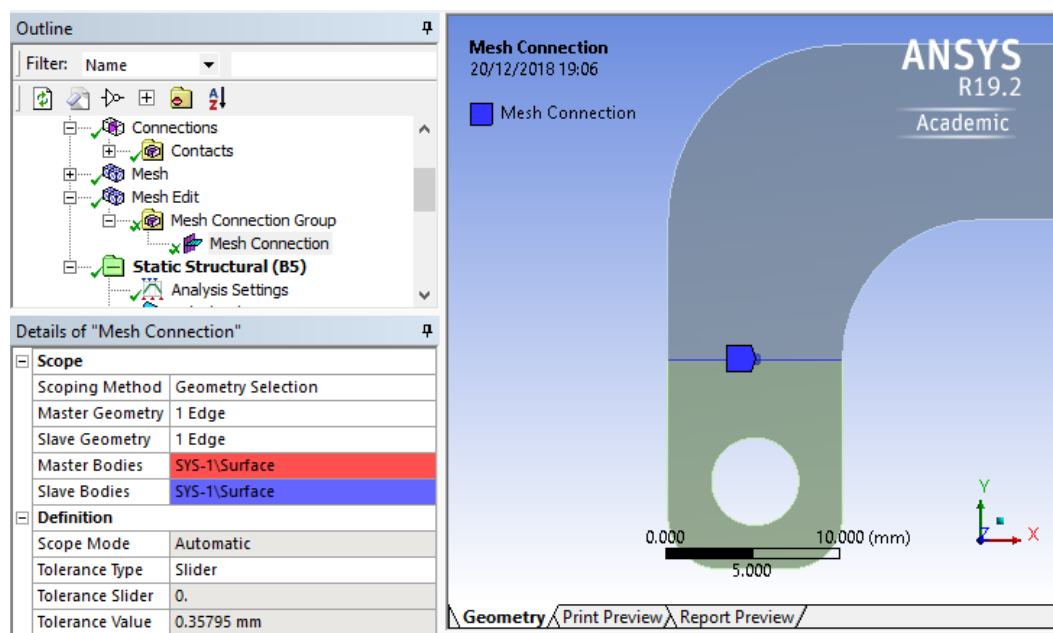


Figura 5.5. Definició d'una connexió de malla contínua entre dos cossos.

5.5. Aplicació de les condicions de contorn

Les condicions de contorn en l'ANSYS Workbench corresponen a la cel·la del component Setup d'un sistema d'anàlisi. Tot i així, com que s'han de definir des de l'ANSYS Mechanical, es pot fer a continuació de la definició del model sense haver de tornar a executar l'aplicació Mechanical. Aquestes fan referència a l'objecte Environment (que apareixerà amb el nom del sistema d'anàlisi que s'estigui realitzant) i, per tant, s'afegiran dins d'aquest objecte.

Hi ha diferents maneres de definir les condicions de contorn, però les més comunes són: mitjançant clic amb el botó dret a l'objecte Environment del panell Outline i seleccionar Insert, o bé directament mitjançant les eines de l'apartat Environment de la caixa d'eines superior, que canvia en funció del tipus d'anàlisi que s'estigui simulant.



Figura 5.6. Apartat Environment de la caixa d'eines per una anàlisi estructural estàtica.

En l'apartat Environment de la caixa d'eines superior, les condicions de contorn estan agrupades dins d'unes categories semblants a les que es troben en l'aplicació de càrregues en l'ANSYS APDL que es detallen a continuació:

- Inertial: inclou acceleracions, gravetat i velocitats i acceleracions angulars.
- Loads: inclou pressions, forces, etc.
- Supports: inclou suports, restriccions de desplaçament, velocitat, etc.
- Conditions: inclou condicions com acoblaments de graus de llibertat, equacions de restricció, etc.
- Direct FE: permet aplicar condicions de contorn directament als nodes dels elements finits de la malla. A diferència de la resta, aquestes condicions s'apliquen a Named Selections de nodes que cal crear prèviament.

Un cop escollida la condició de contorn a aplicar, des del panell Details es defineixen els seus paràmetres. En el camp Geometry de l'apartat Scope s'ha d'escollir en quina part de la geometria es vol aplicar la condició de contorn amb l'ajuda de les eines de selecció de la caixa d'eines. En l'apartat Definition apareixen els camps per definir els valors de les forces, components a restringir-ne el moviment, etc.



Figura 5.7. Eines de selecció.

5.6. Solucionador

La solució de l'anàlisi correspon a la cel·la del component Solution de qualsevol sistema d'anàlisi del Project Schematic. Com passa amb l'aplicació de les condicions de contorn, per solucionar el model es continua treballant des de l'ANSYS Mechanical i, per tant, es pot fer a continuació sense haver de tornar a executar l'aplicació Mechanical.

Per definir les opcions càlcul cal fer clic sobre Analysis Settings dins de l'objecte Environment en el panell Outline. En la Figura 5.8 es mostra com, en el panell Details, es poden definir paràmetres com el nombre de passos per realitzar el càlcul d'un anàlisi no lineal, el tipus de solucionador, l'opció de grans desplaçaments, etc. Més endavant, en l'apartat 6.2, es mostren explicacions més detallades sobre les opcions de càlcul de l'ANSYS Workbench.

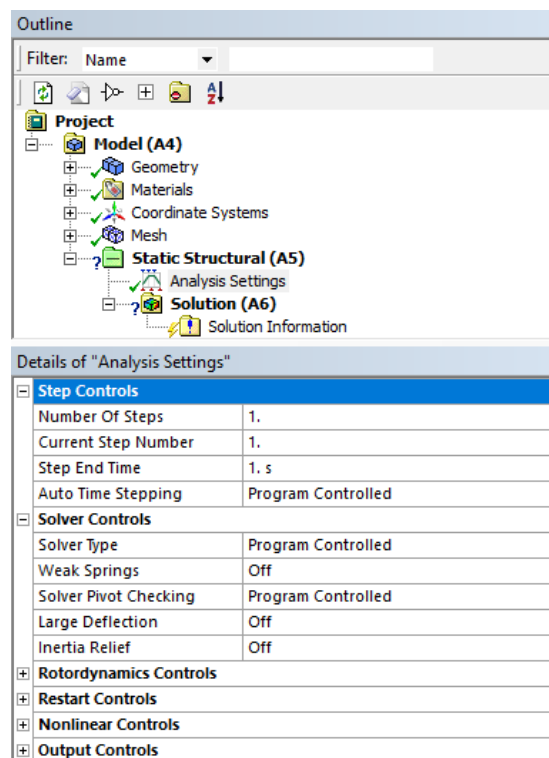


Figura 5.8. Definició de les opcions de càlcul en l'ANSYS Workbench.

Un cop definit el tipus de càlcul a realitzar, es pot solucionar el model fent clic amb el botó dret sobre l'objecte Solution del panell Outline i seleccionar Solve. L'aplicació Mechanical utilitza el mateix solucionador que l'ANSYS APDL, i per tant, s'obtenen els mateixos resultats que s'obtingrien si es fes la mateixa anàlisi en APDL. Un cop completat el procés de solució, el solucionador envia les dades al Mechanical, des d'on es poden veure els resultats.

5.7. Anàlisi de resultats

El post-procés de l'ANSYS Workbench correspon a la cel·la del component Results d'un sistema d'anàlisi del Project Schematic. L'anàlisi de resultats es realitza des de l'aplicació ANSYS Mechanical, pel que no cal tornar a executar-la un cop s'ha solucionat el model. L'objecte Solution dins l'objecte Environment del panell Outline és amb el que es treballa per visualitzar els resultats, en el qual s'afegiran sub-objectes corresponents als resultats a analitzar. El tipus d'anàlisi realitzada determina els resultats disponibles per visualitzar després de la solució. Per exemple, en una anàlisi estructural, apareixeran resultats de tensions o desplaçaments, mentre que en una anàlisi tèrmica, els resultats disponibles seran de temperatura, de flux de calor, etc.

Per afegir un objecte resultat a l'ANSYS Mechanical cal fer clic sobre l'objecte Solution i seleccionar el resultat desitjat en l'apartat Solution de la caixa d'eines superior, o bé fer clic amb el botó dret i seleccionar Insert i el resultat desitjat. Els resultats disponibles estan ordenats en categories segons si es tracta de resultats de desplaçaments, deformacions, tensions, etc. Un cop afegits els resultats a analitzar, cal tornar a solucionar el model o avaluar els resultats fent clic amb el botó dret sobre Solution i seleccionar Solve o Evaluate All Results.

Un cop calculada la solució, aquesta es pot analitzar de diferents maneres. Els gràfics més comuns són els de contorn, que mostren els valors de tensions o deformacions en tota la peça. Si el resultat es vol representar com a gràfic amb vectors, es pot activar l'opció Vector Display de l'apartat Result de la caixa d'eines. Activant les opcions Maximum (MAX) i Minimum (MIN) de la caixa d'eines, es mostren els valors màxim i mínim, respectivament, del resultat que s'estigui mostrant a la finestra gràfica. Finalment, amb l'eina Probe es pot conèixer el valor del resultat en qualsevol punt de la geometria sobre el qual es col·loqui el cursor.



Figura 5.9. Apartat Result de la caixa d'eines de l'ANSYS Mechanical.

6. Anàlisi estàtica

En una anàlisi estructural estàtica es calculen els efectes de les condicions de càrrega estacionàries en una estructura, sense tenir en compte els efectes de càrregues variables en el temps.[3] L'anàlisi pot ser lineal o no lineal. L'ANSYS permet tot tipus de no linealitats: grans deformacions, plasticitat, contactes no lineals, hiperelasticitat, etc.

En aquest apartat es presentaran qüestions més específiques de l'ANSYS Workbench sobre l'anàlisi estàtica (lineal i no lineal) sense detallar els conceptes més generals sobre la utilització del programa explicats en el capítol anterior.

Per començar un projecte, tant per anàlisis lineals i no lineals, cal fer doble clic o arrossegar el tipus d'anàlisi Static Structural al Project Schematic.

6.1. Anàlisi estàtica lineal

L'anàlisi estàtica lineal és la que l'ANSYS Workbench realitza per defecte. Així doncs, és la que requereix menys ajustaments en comparació amb la resta.

El tipus de propietats dels materials corresponents a aquesta anàlisi, dins de l'Engineering Data, es troben en l'apartat Linear Elastic del Toolbox esquerre, que inclou elasticitat isòtropa, ortòtropa i anisòtropa.

- Elasticitat isòtropa: només cal introduir el mòdul de Young i el coeficient de Poisson en els camps corresponents del panell Properties.
- Elasticitat ortòtropa: cal introduir el mòdul de Young, el coeficient de Poisson i el mòdul d'elasticitat transversal per les tres direccions (X, Y i Z).
- Elasticitat anisòtropa: cal introduir els 21 components de la matriu de rigidesa [D] de l'Equació 6.1 en forma tabular en el panell Table (Figura 6.1).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 = \sigma_{xx} \\ \sigma_2 = \sigma_{yy} \\ \sigma_3 = \sigma_{zz} \\ \sigma_4 = \sigma_{yz} \\ \sigma_5 = \sigma_{xz} \\ \sigma_6 = \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & & & & & \\ D_{21} & D_{22} & & & & \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & & & \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & & \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 = \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_4 = \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_5 = \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_6 = \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{sim.} \quad \text{Equació 6.1. [9]}$$

Table of Properties Row 2: Anisotropic Elasticity						
	A	B	C	D	E	F
1	D[*],1 (Pa)	D[*],2 (Pa)	D[*],3 (Pa)	D[*],4 (Pa)	D[*],5 (Pa)	D[*],6 (Pa)
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Figura 6.1. Introducció de la matriu de rigidesa per materials anisòtrops.

6.2. Anàlisi estàtica no lineal

Si l'anàlisi estàtica conté algun dels tres tipus de no linealitats principals (geomètriques, materials, o contactes), cal fer alguns ajustaments en les opcions de càlcul de l'ANSYS Workbench, ja que en cas contrari l'ANSYS tractaria el model com a lineal.

A continuació es detalla quins ajustaments es poden fer per cada tipus de no linealitat per separat i els controls de les opcions de càlcul per anàlisi no lineals. Tot i així, segons el problema, es pot donar el cas que es requereixi tenir en compte més d'un tipus de no linealitat (per exemple, una no linealitat geomètrica causada per una no linealitat material).

6.2.1. No linealitats geomètriques

En el cas que calgui tenir en compte el canvi en la geometria a causa de grans desplaçaments és recomanable activar l'opció Large Deflection. A tal fi, en la definició de les opcions de càlcul del solucionador des de l'ANSYS Mechanical, cal fer clic sobre Analysis Settings dins de l'objecte Environment (reanomenat Static Structural per aquest cas) en el panell Outline i canviar d'Off a On el camp Large Deflection dins de Solver Controls en el panell Details.

D'aquesta manera, l'ANSYS tindrà en compte els canvis en la geometria que provoquen alteracions en la forma i orientació dels elements, actualitzant així la matriu de rigidesa mitjançant un càlcul iteratiu que caldrà definir en les opcions de càlcul.

6.2.2. No linealitats materials

Un altre factor que pot introduir no linealitats en un model és la no linealitat material. Hi ha certs comportaments de la corba tensió-deformació d'un material que fan que canviï la rigidesa del model en diferents nivells de càrrega. Dos dels comportaments no lineals de la corba tensió deformació més comuns són: plasticitat i hiperelasticitat.

Plasticitat

En el cas que el material tingui un comportament plàstic i en el model se superin tensions superiors a les del límit elàstic, a més d'especificar la resposta del tram elàstic lineal a Engineering Data com en l'apartat 6.1, també cal definir la de la zona plàstica. Donat que usualment la diferència entre el límit proporcional i el límit elàstic és molt petita, l'ANSYS considera aquests dos punts com a coincidents. En l'ANSYS Workbench per definir la zona plàstica es pot fer principalment amb dos models: amb enduriment isòtrop (Isotropic Hardening) o amb enduriment cinemàtic (Kinematic Hardening), si es vol incloure l'efecte Bauschinger. Aquests alhora es poden definir com a bilineals o multilineals.

- Models bilineals: en el panell esquerre Toolbox, seleccionar Bilinear Isotropic Hardening o Bilinear Kinematic Hardening. A continuació, en el panell Properties cal introduir el límit elàstic en el camp Yield Strength i el mòdul tangent en el camp Tangent Modulus.
- Models multilineals: en el panell esquerre Toolbox, seleccionar Multilinear Isotropic Hardening o Multilinear Kinematic Hardening. A continuació, en el panell Table es poden introduir parelles de valors de tensió i deformació plàstica en forma de taula, per diferent temperatures. Cal tenir en compte que el primer punt de la corba ha de ser el punt de límit elàstic, és a dir, deformació plàstica nul·la i tensió de límit elàstic.

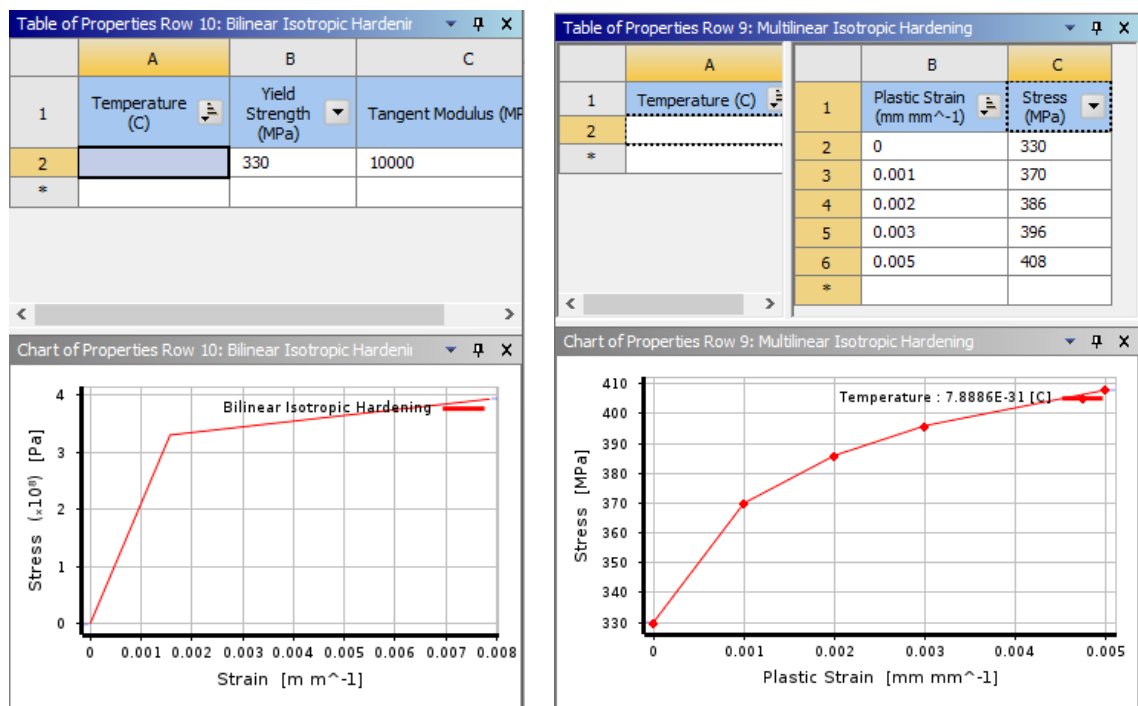


Figura 6.2. Introducció de la zona plàstica d'una corba tensió-deformació bilineal (esquerra) i multilíneal (dreta).

L'ANSYS Workbench actualment no permet definir comportaments de la corba tensió-deformació diferents en tracció i compressió (comanda TB,ANISO en ANSYS APDL).

Hiperelasticitat

En relació als materials hiperelàstics, l'ANSYS Workbench disposa de nombrosos models segons l'equació del potencial elàstic. Els models disponibles són: Neo-Hookeà, Arruda-Boyce, Gent, Blatz-Ko, Mooney-Rivlin, polinòmic, Yeoh, Ogden i funció resposta. En el mòdul de l'Engineering Data cal fer doble clic sobre el model desitjat dins de l'apartat Hyperelastic del Toolbox esquerre i, a continuació, introduir les constants del model en els camps corresponents del panell Properties.

6.2.3. Contactes

Un altre tipus de no linealitat és la causada per la inclusió de contactes en el model, ja que es produeix un canvi en la rigidesa en funció de si els cossos entren o no en contacte. Els tres tipus de contacte que permeten la separació en la direcció normal entre els cossos i que, per tant, introdueixen una no linealitat són: Frictionless, Frictional i Rough.

Tipus de contacte	Iteracions	Comportament normal	Comportament tangencial
Bonded	1	Sense separació	Sense lliscament
No Separation	1	Sense separació	Lliscament permès
Frictionless	Múltiples	Separació permesa	Lliscament permès
Rough	Múltiples	Separació permesa	Sense lliscament
Frictional	Múltiples	Separació permesa	Lliscament permès

Taula 6.1. Comportament de cada tipus de contacte 0.

6.2.4. Opcions de càlcul no lineals

En el cas d'una anàlisi estàtica no lineal, cal definir les opcions del càlcul iteratiu. Tots els ajustaments pertinents es poden definir des del panell Details, fent clic abans sobre l'objecte Analysis Settings dins de l'objecte Environment (reanomenat Static Structural per aquest cas) en el panell Outline. Les opcions estan dividides en quatre apartats principals: Step Controls, Solver Controls, Nonlinear Controls i Output Controls.

El primer apartat, Step Controls, permet definir el nombre de passos d'aplicació de les càrregues i sub-passos de cada càlcul iteratiu. En el camp Number Of Steps es pot introduir el nombre total de passos. En cada pas del càlcul es poden definir opcions diferents i un nombre de sub-passos diferents. Per seleccionar el pas a definir es pot introduir el número del pas en el camp Current Step Number o fer-hi clic en el panell Graph o Tabular Data. L'opció Auto Time Stepping, que optimitza el nombre de sub-passos, permet triar entre tres opcions: controlada pel programa, activada o desactivada.

- L'opció per defecte (Program Controlled) fa que l'ANSYS desactivi o activi aquesta funció segons si el problema és lineal o no lineal, respectivament, sense poder definir el rang de valors màxim i mínim de sub-passos.

Tipus d'anàlisi	Sub-passos inicials	Sub-passos mínims	Sub-passos màxims
Lineal	1	1	1
No lineal	1	1	10

Taula 6.2. Nombre de sub-passos predeterminats per l'opció Program Controlled 0.

- Si s'activa (On), s'habiliten tres camps per definir el nombre inicial de sub-passos amb el qual iniciar la iteració, i un nombre màxim i mínim de sub-passos en cada pas.
- Mentre que si es desactiva (Off), l'ANSYS farà el càlcul amb el nombre de sub-passos que s'especifiqui sense intentar optimitzar-lo.

En l'apartat Solver Controls es troba el camp Large Deflections per activar l'opció de grans desplaçaments si és que el problema ho requereix.

L'ANSYS utilitza el mètode de Newton-Raphson per solucionar problemes no lineals. En el cas que es vulgui configurar el procés d'iteració de Newton-Raphson o els criteris de convergència de la solució, es poden modificar els paràmetres de l'apartat Nonlinear Controls. Segons la freqüència amb la qual es vulgui actualitzar la matriu de rigidesa, l'ANSYS permet escollir entre diferents mètodes de Newton-Raphson: controlat pel programa (que escull l'opció més adequada), complet, modificat i asimètric.

Finalment, l'apartat Output Controls permet especificar quines magnituds i amb quina freqüència s'han de guardar els resultats per tal que estiguin disponibles en el post-procés. Per defecte, ja estan activades les opcions de tensions i deformacions. En relació a la freqüència d'escriptura dels resultats al fitxer de sortida, l'ANSYS permet escollir entre: en cada punt de temps (opció per defecte), en l'últim punt, en punts de temps espaiats cada cert temps o en punts de temps separats cada cert nombre de punts.

7. Anàlisi dinàmica

En una anàlisi estructural dinàmica es calculen els efectes de les condicions de càrrega dinàmiques en una estructura, és a dir, càrregues que canvien en el temps més ràpidament que la freqüència natural de l'estructura.[3]

En aquest apartat es presentaran qüestions més específiques de l'ANSYS Workbench sobre tres tipus d'anàlisis dinàmiques (modal, resposta harmònica i transitòria), sense detallar els conceptes més generals sobre la utilització del programa.

7.1. Anàlisi modal

Una anàlisi modal permet obtenir les freqüències naturals i modes de vibració naturals associats a cada freqüència natural d'una estructura. En aquest cas, qualsevol no linealitat (per exemple, plasticitat, elements de contacte, etc.) és ignorada. Per començar una anàlisi modal a l'ANSYS Workbench cal fer doble clic o arrossegar el tipus d'anàlisi Modal al Project Schematic.

Quant a la definició de les propietats del material, cal tenir en compte que els requeriments bàsics per realitzar aquest tipus d'anàlisi són l'especificació de la rigidesa i massa de l'estructura. Per definir-ne la rigidesa cal determinar, en el mòdul d'Engineering Data, els paràmetres elàstics del material (mòdul elàstic i coeficient de Poisson) amb un model isòtrop, ortòtrop o anisòtrop de la mateixa manera que en l'apartat 6.1 Anàlisi estàtica lineal. Per altra banda, per definir-ne la massa es pot fer afegint la densitat del material, fent doble clic la propietat Density de l'apartat Physical Properties del Toolbox esquerre.

En el cas d'una anàlisi modal hi ha certes opcions de càlcul del solucionador de l'ANSYS Mechanical que es poden definir des del panell Details, fent clic abans sobre Analysis Settings dins de l'objecte Environment (reanomenat Modal per aquest cas) en el panell Outline. Les opcions estan dividides principalment en dos apartats bàsics: Options i Solver Controls.

El primer apartat, Options, permet especificar el nombre de freqüències naturals a solucionar. En el camp Max Modes To Find es pot definir el nombre de freqüències d'interès, que per defecte són 6. En el cas que es vulgui donar un rang de freqüències en el qual buscar les freqüències naturals, s'ha d'activar l'opció Limit Search Range a Yes i especificar els valors de les freqüències màximes i mínimes del rang.

En l'apartat Solver Controls es troba el camp Damped per especificar si el sistema modal és esmorteït o no. Per defecte, l'ANSYS considera que el sistema no és esmorteït.

Per obtenir les freqüències naturals de l'estructura un cop solucionat el model cal fer clic a l'objecte Solution del panell Outline. D'aquesta manera es mostraran les freqüències naturals en forma de gràfic de barres en la finestra inferior esquerra Graph i en forma de llista tabulada en la finestra inferior dreta Tabular Data, com es mostra en l'exemple la Figura 7.1. Per calcular les formes dels modes de cada freqüència natural cal seleccionar les freqüències naturals en la finestra Tabular Data, fer clic amb el botó dret sobre elles i seleccionar Create Mode Shape Results. Això crearà un objecte de desplaçaments per cada forma de mode dins l'objecte Solution que caldrà tornar a avaluar. En la Figura 7.2 es mostren els resultats del tercer mode de l'exemple anterior.

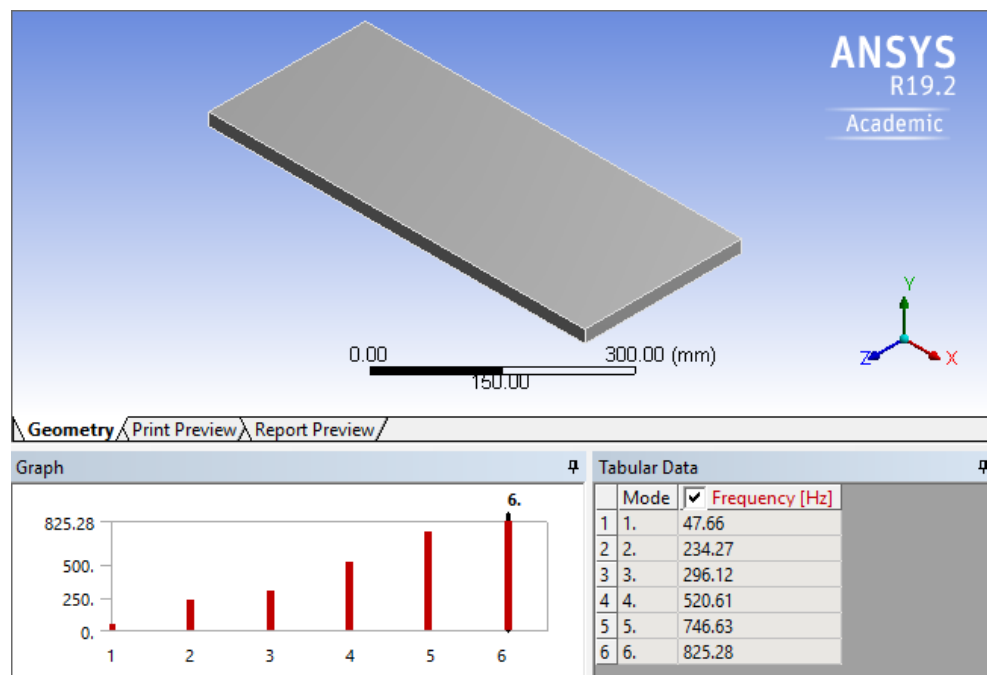


Figura 7.1. Freqüències naturals obtingudes amb una anàlisi modal en ANSYS Workbench.

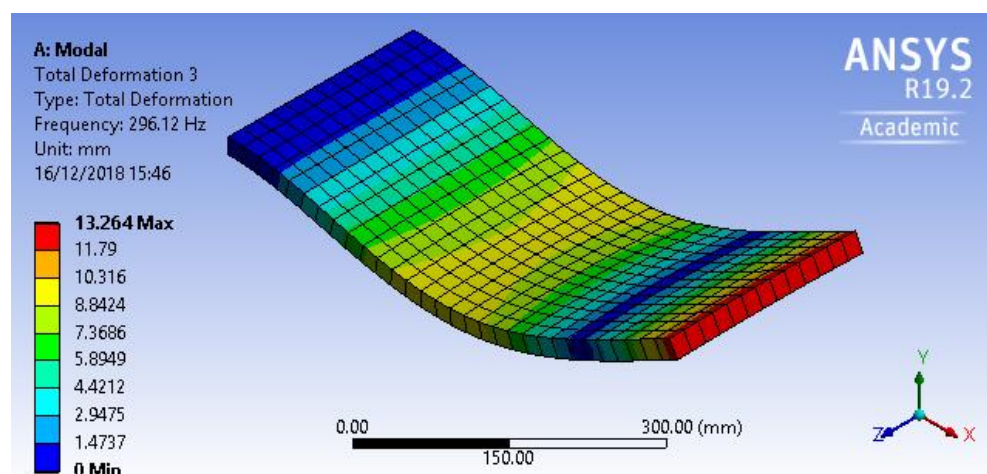


Figura 7.2. Tercer mode obtingut amb una anàlisi modal en ANSYS Workbench.

7.2. Anàlisi de resposta harmònica

L'anàlisi de resposta harmònica permet determinar la resposta harmònica d'una estructura sotmesa a càrregues sinusoïdals (harmòniques) estacionàries.[3] Es tracta d'una anàlisi lineal, pel que qualsevol no linealitat (per exemple, plasticitat, elements de contacte, etc.) és ignorada. Per començar una anàlisi de resposta harmònica cal fer doble clic o arrossegar el tipus d'anàlisi Harmonic Response al Project Schematic.

Com en el cas de l'anàlisi modal, l'ANSYS requereix especificar la rigidesa i massa de l'estructura en la definició de les propietats dels materials al mòdul d'Engineering Data, mitjançant els paràmetres elàstics del material (mòdul elàstic i coeficient de Poisson) i la densitat del material, respectivament.

En relació a les opcions de càlcul de l'anàlisi de resposta harmònica, les configuracions principals es troben en l'apartat Options del panell Details, havent seleccionat prèviament l'objecte Analysis Settings dins de l'objecte Environment (reanomenat Harmonic Response per aquest cas). Els camps Range Minimum i Range Maximum permeten definir el rang de freqüències en el qual es vol realitzar l'anàlisi, mentre que en el camp Solution Intervals es pot introduir el nombre d'interval·ls en els quals es vol dividir el rang.

L'ANSYS Mechanical proporciona dos mètodes de resolució: el complet (Full) i el de superposició de modes (Mode-Superposition). Donat que el primer calcula els desplaçaments i tensions d'un sol pas, i el segon aprofita les freqüències naturals i modes d'una anàlisi modal per arribar a la solució, el temps de càlcul és inferior en aquest últim. Per escollir el mètode de resolució desitjat cal seleccionar-lo en el menú desplegable del camp Solution Method de l'apartat Options. Per defecte, l'ANSYS utilitza el mètode de superposició de modes. Amb aquest mètode, també hi ha l'opció d'incloure més resultats en els punts propers a les freqüències naturals per obtenir solucions de la resposta més precises activant l'opció Cluster Results a Yes, que per defecte es troba desactivada.

Adicionalment, si el sistema ho requereix, en l'apartat Damping Controls es pot introduir un coeficient d'esmoreïment de l'estructura en el camp Constant Damping Ratio (si s'utilitza el mètode de superposició de modes) o Structural Damping Coefficient (si s'utilitza el mètode complet).

Si bé totes les càrregues aplicades en un anàlisi de resposta harmònica han de tenir la mateixa freqüència, l'ANSYS permet definir un desfasament entre elles. A tal fi, cal introduir el desfasament desitjat en el camp Phase Angle en el moment d'introduir el valor de la càrrega. Les unitats del desfasament (graus o radians) es poden escollir des de la barra superior, fent clic a Units.

Quant al post-procés, pels gràfics de resultats de tensions o deformacions s'ha d'especificar la freqüència d'excitació i desfasament en els camps Frequency i Sweeping Phase de l'apartat Definition del panell Details corresponent al resultat. Un altre tipus de gràfics que es poden extreure de l'ANSYS Workbench són els de resposta de freqüència i els de resposta de fase, que mostren la dependència de la magnitud que s'esculli (tensió, deformació, desplaçament, etc.) en un punt en concret, que cal escollir en el camp Geometry de l'apartat Scope, respecte a la freqüència d'excitació o el desfasament. En les figures presentades a continuació es mostra, per l'exemple anterior, un gràfic de resposta de freqüència sense l'opció de Cluster Results (Figura 7.3) o havent-la activat (Figura 7.4).

Frequency Response

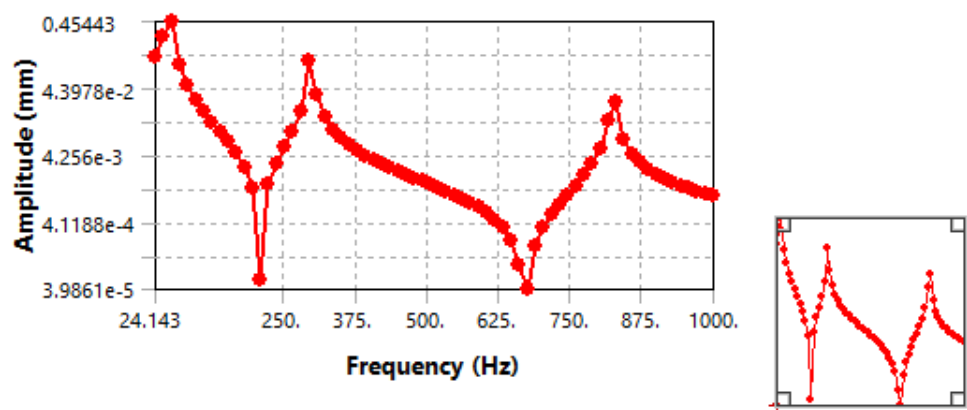


Figura 7.3. Amplitud d'oscil·lació de l'extrem central de la placa respecte la freqüència d'excitació (Cluster Results: No).

Frequency Response

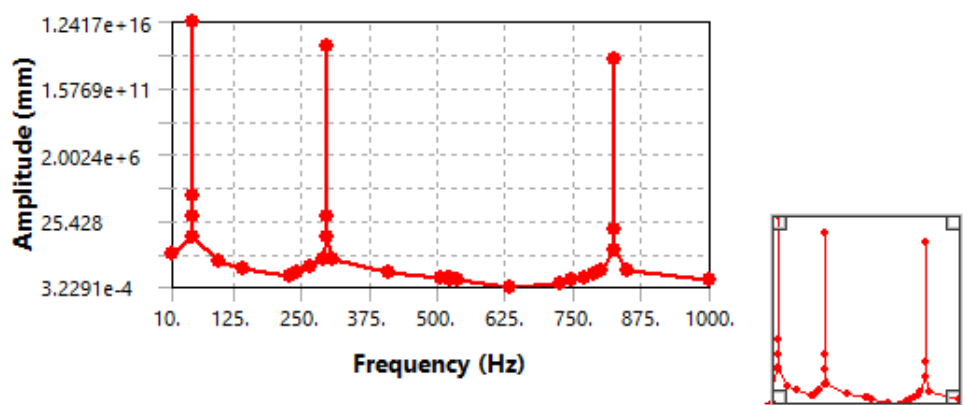


Figura 7.4. Amplitud d'oscil·lació de l'extrem central de la placa respecte a la freqüència d'excitació (Cluster Results: Yes).

7.3. Anàlisi transitòria

L'anàlisi transitòria permet calcular la resposta d'una estructura sotmesa a càrregues que canvien en el temps.[3] L'anàlisi es pot solucionar mitjançant el mètode complet (Full) o amb el mètode de superposició de nodes (Mode-Superposition). En el cas que s'utilitzi el mètode complet, s'admeten no linealitats en el model (geomètriques, materials o de contacte), mentre que el mètode de superposició de modes no ho permet. Per començar una anàlisi transitòria amb el mètode complet cal fer doble clic o arrossegar el tipus d'anàlisi Transient Structural al Project Schematic. Per utilitzar el mètode de superposició de modes cal acoblar l'anàlisi transitòria a una anàlisi modal. A tal fi, primer s'afegeix el tipus d'anàlisi Modal al Project Schematic i a continuació s'arrossega el tipus d'anàlisi Transient Structural sobre la cel·la Solution de l'anàlisi modal afegida prèviament, com es mostra a la Figura 7.5.

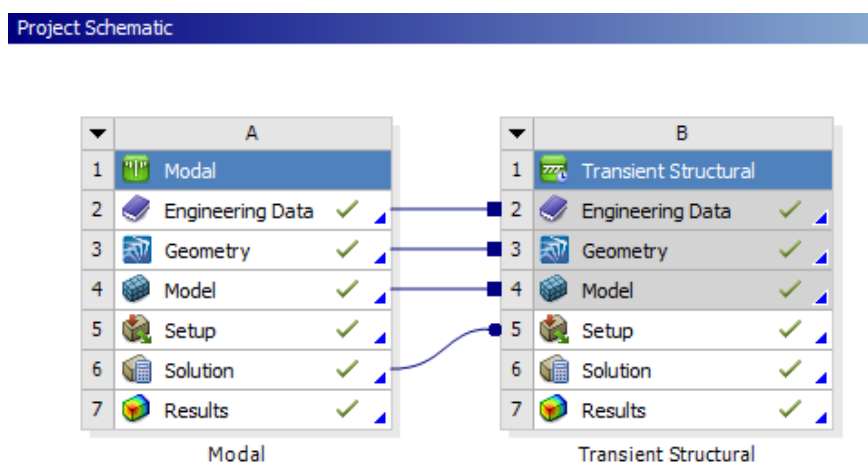


Figura 7.5. Esquema d'un projecte amb una anàlisi modal i una anàlisi transitòria (amb el mètode de superposició de modes).

Com en els casos anteriors d'anàlisis dinàmiques, l'ANSYS requereix especificar la rigidesa i massa de l'estructura en la definició de les propietats dels materials al mòdul d'Engineering Data mitjançant els paràmetres elàstics del material (com també la plasticitat, si el problema ho requereix) i la densitat del material, respectivament.

En el cas d'una anàlisi transitòria, les opcions de càlcul són semblants a les de l'anàlisi estàtica no lineal, ja que pot ser necessari definir un càlcul iteratiu. Tots els ajustaments pertinents es poden definir des del panell Details, fent clic abans sobre l'objecte Analysis Settings dins de l'objecte Environment (reanomenat Transient Structural per aquest cas) en el panell Outline. Les opcions estan dividides en quatre apartats principals: Step Controls, Solver Controls, Nonlinear Controls i Output Controls. Els detalls sobre els paràmetres que es poden modificar en cada apartat ja s'han mostrat en la secció 6.2.4 Opcions de càlcul no lineals.

Pel càlcul transitori, s'han d'especificar les condicions inicials del sistema. Per defecte, l'ANSYS considera que aquest està en repòs, però es pot donar el cas que existeixi una certa velocitat inicial d'alguna de les seves parts. Per introduir una velocitat inicial cal fer clic amb el botó dret sobre Initial Conditions i seleccionar Insert → Velocity. Des del panell Details s'ha de seleccionar la geometria (punt, línia, cos, etc.) que es troba en moviment en el camp Geometry de l'apartat Scope i introduir el valor de la velocitat en forma de vector (introduint el mòdul i direcció) o mitjançant les seves components, segons si el camp Define By es troba a Vector o Components, respectivament.

En el cas que es vulguin aplicar càrregues variables en el temps, aquestes es poden especificar mitjançant l'històric de la càrrega en forma tabular. A l'hora de definir la càrrega des del panell Details, en el camp Magnitude de l'apartat Definition cal seleccionar l'opció Tabular (Time). A continuació, es poden anar introduint les parelles de temps i valor de la càrrega en les columnes en el panell inferior dret anomenat Tabular Data, com es mostra en la Figura 7.6.

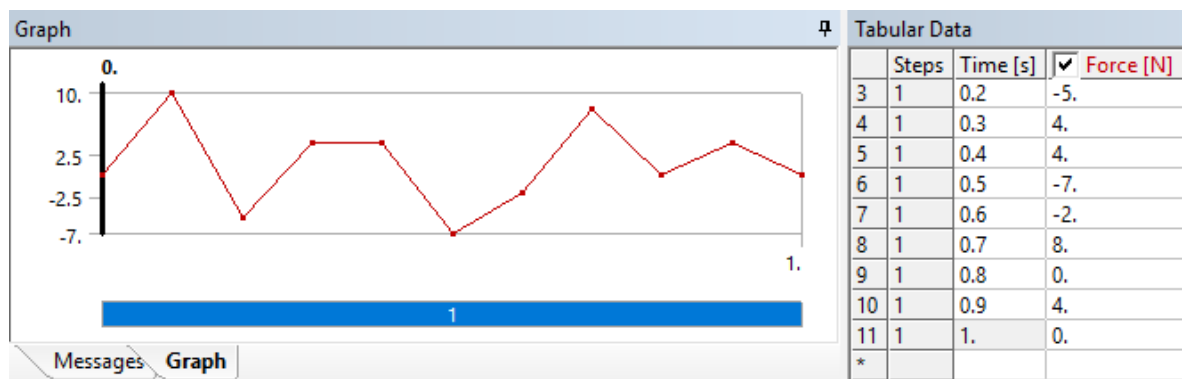


Figura 7.6. Introducció de l'històric d'una càrrega.

7.4. Anàlisi espectral

L'anàlisi espectral permet determinar la màxima resposta (desplaçament, velocitat, acceleració, etc.) d'una estructura sotmesa a moviments sísmics mitjançant la combinació modal.[3] Es tracta d'una anàlisi lineal i per la qual cosa qualsevol no linealitat (per exemple, plasticitat, elements de contacte, etc.) és ignorada. Per començar una anàlisi espectral amb l'ANSYS Workbench, primer cal afegir una anàlisi de tipus Modal al Project Schematic i, a continuació, arrossegant el tipus d'anàlisi Response Spectrum sobre la cel·la Solution de l'anàlisi modal afegida prèviament com es mostra en la Figura 7.7.

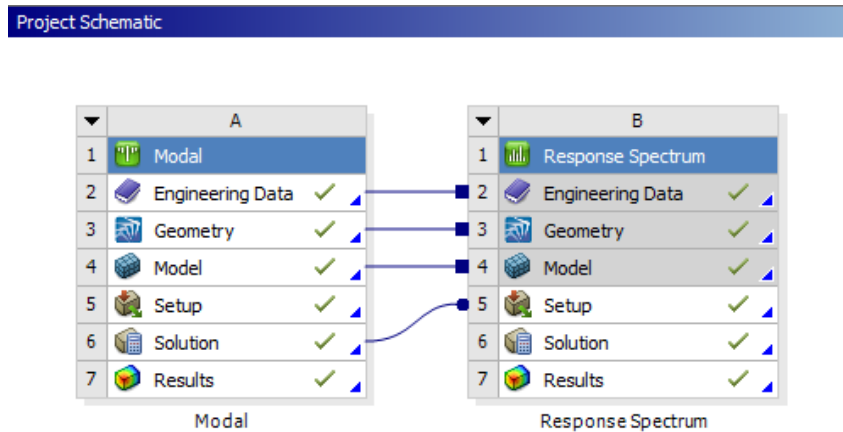


Figura 7.7. Esquema d'un projecte d'una anàlisi espectral.

Els tres tipus d'excitació disponibles en una anàlisi espectral són excitacions de desplaçament, velocitat i acceleració. Per introduir una excitació cal fer clic amb el botó dret sobre Response Spectrum, seleccionar Insert i el tipus d'excitació desitjada (RS Acceleration, RS Velocity o RS Displacement). Des del panell Details, es pot aplicar l'excitació sobre tots els suports seleccionant All Supports al camp Boundary Condition de l'apartat Scope. A continuació cal introduir de forma tabular l'excitació (desplaçament, velocitat o acceleració) a cada freqüència en el panell inferior dret Tabular Data. Finalment, cal definir la direcció de l'excitació en el camp Direction de l'apartat Definition del panell Details, escollint un dels eixos globals (X, Y o Z).

En el cas d'una anàlisi espectral hi ha certes opcions de càlcul del solucionador de l'ANSYS Mechanical que es poden definir des del panell Details, fent clic abans sobre Analysis Settings dins de l'objecte Environment (reanomenat Response Spectrum per aquest cas) en el panell Outline. Les configuracions principals es troben en l'apartat Options. En el camp Number Of Modes To Use cal definir el nombre de modes obtinguts amb l'anàlisi que es volen utilitzar. Per defecte, els utilitzarà tots. En el camp Spectrum Type es pot escollir el tipus d'espectre a utilitzar pel càlcul (Single Point o Multiple Points). Finalment, en el camp Modes Combination Type cal seleccionar el mètode de combinació modal desitjat: arrel quadrada de la suma de quadrats (SRSS), combinació quadràtica completa (CQC) o combinació de doble suma de Rosenblueth (ROSE).

Conclusions

Amb la realització d'aquest projecte s'han extret les següents conclusions.

Dels estudis previs dels capítols 3 i 4 es conclou que, per una banda, atenent als resultats de l'enquesta a 31 estudiants de l'ETSEIB, les seves queixes sobre l'ANSYS APDL i les informacions sobre la voluntat de l'empresa de potenciar com a producte principal l'ANSYS Workbench, s'ha considerat interessant estudiar si una possible actualització a la versió nova està justificada. Per altra banda, tot i centrar el projecte en l'actualització al Workbench, inicialment també s'ha estudiat una alternativa de programari lliure com és el Salome-Meca que, pel seu potencial i per la comunitat educativa i professional que el recolza, ha resultat una opció interessant a valorar de cara al futur.

De la investigació a fons dels aspectes clau del Workbench reflectida en els capítols 5, 6 i 7 es conclou que, primerament, pel que fa al mallat en elements finits del model (l'aspecte que més dificultat presenta per als estudiants) es creu que el Workbench proporciona més eines per ajustar el mallat a la geometria del problema, fet que pot arribar a facilitar-ne el procés. A més, compta amb una eina de comprovació de la qualitat del mallat. Tot i així, a diferència de l'APDL que avisa quan el mallat no és adequat, el Workbench ignora els malls mallats, de manera que amb l'APDL és més fàcil aconseguir bons malls.

En segon lloc, la creació de la geometria amb el Workbench és un dels aspectes que més es veu millorat respecte la versió antiga. Ja sigui mitjançant una de les dues aplicacions de CAD que incorpora, com amb la importació de models creats externament, es facilita molt més la creació de geometries sigui quina sigui la seva complexitat. Si bé és cert que, al disposar de més eines, d'entrada les aplicacions de CAD incorporades poden presentar més dificultats per utilitzar-les, a la llarga es creu que se'n pot aprendre fàcilment, degut a les seves similituds amb altres programaris de CAD com el SolidWorks que s'utilitza en altres assignatures.

En tercer lloc, donat que la interacció amb la geometria s'ha vist millorada, altres aspectes com, per exemple, l'aplicació de les condicions de contorn n'han sortit beneficiats. A més, això ajuda al fet que el programa en general sigui més intuïtiu i visualment més agradable, característiques que els estudiants troben a faltar a l'ANSYS APDL.

En quart lloc, tot i que aspectes com la llibreria de materials amb les seves propietats ja incorporades o la selecció automàtica del tipus d'element finit segons el tipus d'anàlisi i geometria poden semblar que d'entrada facilitin encara més el procés, s'ha d'anar en compte amb com s'utilitzen i assegurar-se que el que el Workbench assumeix és el que realment s'adequa al problema, ja que en cas contrari s'obtidrien resultats erronis.

Finalment, tot i no haver-les explorat durant la realització d'aquest projecte, l'empresa Ansys Inc. també ha afegit noves funcionalitats al Workbench que el diferencien de l'APDL, com el sistema d'anàlisi d'optimització topològica o el mòdul d'anàlisi de fatiga desenvolupat conjuntament amb l'empresa especialitzada en anàlisis de fatiga i durabilitat nCode. El Workbench i la seva estructura de blocs fan que sigui molt fàcil acoblar diferents sistemes d'anàlisi i resoldre problemes estructurals de manera més completa.

En conjunt, es creu que l'ANSYS Workbench aporta més millores respecte a l'ANSYS APDL que inconvenients i, per això, es veu justificada la transició al nou programa. A més, moltes de les queixes que els estudiants tenen sobre la versió antiga són resoltes amb el Workbench. Tanmateix, s'ha vist que els usuaris provinents de l'ANSYS APDL necessiten una mínima formació abans d'utilitzar-lo, i és per això que s'ha cregut oportú estructurar un curs d'introducció al programa (Annex D).

Paral·lelament a la realització d'aquest projecte, s'han adaptat tres guions procedimentals de resolució d'exercicis mitjançant l'APDL a la versió de l'ANSYS Workbench (Annexos A, B i C), dels quals se n'ha pogut posar a prova un, el de l'assignatura de Mecànica dels Medis Continus, amb un grup de pràctiques. Pel que fa al seguiment de la pràctica amb el guió elaborat, no hi va haver cap inconvenient major. Tot i així, durant la sessió van sorgir alguns problemes de compatibilitat de l'aplicació de la creació de la geometria ANSYS SpaceClaim amb el tallafocs dels ordinadors de l'aula, fet que va alentir lleugerament el transcurs de la pràctica. Un altre aspecte a considerar és que el Workbench utilitza més memòria de l'ordinador que l'APDL, a causa de la interfície gràfica superior, i de cara al futur s'hauria d'assegurar que els ordinadors disponibles a l'ETSEIB permeten utilitzar el Workbench satisfactòriament.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] ANSYS Inc. *ANSYS Release 19.2 Documentation*. 2018.
- [2] ANSYS Inc. *ANSYS Student* [en línia]. [<https://www.ansys.com/academic/free-student-products>, 19 de setembre de 2018].
- [3] ANSYS Inc. *Structural Analysis Guide*. 2009. [<https://pdfs.semanticscholar.org/82b7/b60c1234e0ecf01e52af0e9bebb7f79d6330.pdf>, 28 d'octubre de 2018].
- [4] BONADA, J. i altres. *Mecànica dels Medis Continus. Pràctiques de Laboratori*. UPC, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, 2018.
- [5] DASSAULT SYSTÈMES. *ABAQUS Student Edition* [en línia]. [<https://academy.3ds.com/en/software/abaqus-student-edition>, 19 de setembre de 2018].
- [6] DEAN, A. Review: Ansys Workbench 15. *DEVELOP3D* [en línia]. 27 de maig de 2014. [<https://www.develop3d.com/reviews/review-ansys-workbench-15>, 3 de gener de 2019].
- [7] DHONT, G., WITTIG, C. *CALCULIX: A Free Software Three-Dimensional Structural Finite Element Program*. Röhrmoos, 1998. [<http://www.calculix.de/>, 17 de setembre de 2018].
- [8] ÉLECTRICITÉ DE FRANCE. *Presentation of code_aster and SalomeMeca*. 2017. [<https://www.code-aster.org/UPLOAD/DOC/Formations/01-overview-2.pdf>, 18 de setembre de 2018].
- [9] KELLY, P. *Solid Mechanics Part I: An Introduction to Solid Mechanics* [en línia]. Section 6.3 Anisotropic Elasticity, p. 156–166, University of Auckland, 2015. [<http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks>, 25 de novembre de 2018].
- [10] MSC SOFTWARE. *MSC Nastran Student Edition* [en línia]. [<http://www.mssoftware.com/page/msc-nastran-student-edition>, 20 de setembre de 2018].

- [11] UNIVERSITAT DE BAYREUTH. *Z88Aurora*. Bayreuth, 2018. [https://en.z88.de/z88aurora/, 18 de setembre de 2018].

Bibliografia complementària

LEE, H. H. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 19*. SDC Publications, 2018.

MARTÍNEZ, X. Material del curs MAE 656 Advanced Computer Aided Design [en línia]. West Virginia University, 2012. [https://web.cimne.upc.edu/users/xmartinez/MAE656/index.html]

VADAKKAN, S. *A subject we take for granted: Difference between Ansys WB and APDL*. [en línia]. 19 de maig de 2016. [https://www.linkedin.com/pulse/subject-we-take-granted-difference-between-ansys-wb-apdl-shijo/]